

LINEE GUIDA PER UNA CORRETTA PROGETTAZIONE ACUSTICA DI AMBIENTI SCOLASTICI

*Original*

LINEE GUIDA PER UNA CORRETTA PROGETTAZIONE ACUSTICA DI AMBIENTI SCOLASTICI / Astolfi, Arianna; Garai, Massimo. - ELETTRONICO. - (2017), pp. 1-71.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2711487 since: 2018-07-29T10:27:38Z

*Publisher:*

Associazione Italiana di Acustica

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

openAccess

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

**LINEE GUIDA**  
PER UNA CORRETTA  
PROGETTAZIONE  
ACUSTICA DI  
**AMBIENTI  
SCOLASTICI**



## • A CURA DI •

**ARIANNA ASTOLFI** - Politecnico di Torino

<https://orcid.org/0000-0003-2010-6884>

**MASSIMO GARAI** - Università di Bologna

<https://orcid.org/0000-0002-8708-2314>

---

## • AUTORI •

**LUCA BARBARESI** - Università di Bologna

<http://orcid.org/0000-0002-9515-7128>

**ANTONINO DI BELLA** - Università di Padova

<http://orcid.org/0000-0002-0842-1198>

**PATRIZIO FAUSTI** - Università di Ferrara

<http://orcid.org/0000-0003-3851-3410>

**ROBERTO FURLAN** - Acustica Scientifica e Tecnica, Elettroacustica,  
Pieve di Sacco (PD)

<http://orcid.org/0000-0002-0377-0444>

**ALESSIA GRIGINIS** - ONLECO S.r.l., Torino

<http://orcid.org/0000-0001-7074-8688>

**GAETANO LICITRA** - ARPAT, Livorno

<https://orcid.org/0000-0003-4867-0954>

**LUIGI MAFFEI** - Università della Campania "Luigi Vanvitelli"

<https://orcid.org/0000-0003-4130-5065>

**RICHARD OBERKALMSTEINER** - APPA,  
Provincia Autonoma di Bolzano - Alto Adige

**NICOLA PRODI** - Università di Ferrara

<https://orcid.org/0000-0002-2654-6445>

**SIMONE SECCHI** - Università di Firenze

<https://orcid.org/0000-0002-8539-1578>

**GIOVANNI SEMPRINI** - Università di Bologna

<https://orcid.org/0000-0002-5388-8029>

---

PROGETTO GRAFICO A CURA DI

SONJA DI BLASIO  
Politecnico di Torino

---

Associazione Italiana di Acustica  
c/o CNR - Istituto di Acustica e Sensoristica "O.M. Corbino"  
Via del Fosso del Cavaliere 100, 00133 - Roma  
2017



Eccetto dove diversamente specificato, i contenuti  
di questo sito sono rilasciati sotto Licenza Creative  
Commons Attribuzione 3.0 Italia.

<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

ISBN 978-88-88942-53-7

# SOMMARIO

---

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>PREMESSA</b>   | <b>5</b>  |
| <b>CAPITOLO 1</b> | <b>Il controllo del rumore esterno ..... 7</b>  |
| 1.1               | La scelta del sito ..... 9  |
| 1.2               | Raccomandazioni per i livelli di rumore all'esterno degli edifici scolastici ..... 11               |
| 1.3               | Il clima acustico ..... 11  |
| 1.4               | Il rumore e le vibrazioni dovuti a infrastrutture stradali, ferroviarie e aeroportuali ..... 12     |
| 1.5               | Le barriere acustiche e gli interventi sulle pavimentazioni stradali ..... 13                       |
| <b>CAPITOLO 2</b> | <b>La relazione tra edificio scolastico e sorgenti di rumore ..... 15</b>                           |
| 2.1.              | La collocazione e la forma dell'edificio scolastico ..... 16  |
|                   | Sistemazione orografica del territorio ..... 16   |
|                   | Orientamenti progettuali ..... 16   |
| 2.2.              | La distribuzione degli ambienti interni dell'edificio in relazione alle sorgenti di rumore ..... 19 |
| 2.3               | Il rumore delle scuole verso gli edifici adiacenti ..... 19   |
| <b>CAPITOLO 3</b> | <b>Il fonoisolamento ..... 21</b>   |
| 3.1               | Il serramento vetrato ..... 24  |
| 3.2               | Le porte ..... 24   |
| 3.3               | Le pareti di separazione fra ambienti ..... 25  |
| 3.4               | I solai e i rumori impattivi ..... 25   |
| 3.5               | I giunti di collegamento tra le strutture ..... 27  |
| <b>CAPITOLO 4</b> | <b>Il controllo del rumore degli impianti ..... 29</b>  |
| 4.1               | Gli impianti di climatizzazione e ventilazione ..... 31   |
|                   | Ventilatori ..... 31  |
|                   | Canalizzazioni ..... 31   |
|                   | Diffusori dell'aria e terminali di climatizzazione ..... 32   |
|                   | Ricambio dell'aria ..... 33   |
|                   | Caldaie e bruciatori ..... 33   |
|                   | Gruppi frigoriferi e pompe di calore ..... 33   |
|                   | Reti idroniche ..... 34   |
| 4.2               | Gli impianti idrosanitari ..... 34  |
| 4.3               | Gli ascensori ..... 35  |

|                       |   |               |
|-----------------------|---|---------------|
| <b>CAPITOLO 5</b>     | <b>Favorire la comprensione del parlato .....</b>           | <b>37</b>     |
| 5.1                   | Le aule per la didattica .....                              | 40            |
|                       | Volume e forma .....  | 40            |
|                       | Controllo degli echi ripetuti e singoli .....               | 41            |
|                       | Suono diretto .....   | 43            |
|                       | Prime riflessioni .....                                     | 43            |
|                       | Riverberazione .....  | 44            |
|                       | Supporto dell'amplificazione elettroacustica .....          | 46            |
| 5.2                   | Spazi didattici a pianta aperta e semi-aperta .....         | 46            |
| 5.3                   | Le aule per gli allievi con problemi di udito .....         | 50            |
| 5.4                   | Le sale conferenze .....                                    | 51            |
| 5.5                   | I sistemi di amplificazione sonora .....                    | 52            |
|                       | Tipologie e schemi principali .....                         | 52            |
|                       | Considerazioni pratico-applicative .....                    | 53            |
|                       | Indicazioni di massima per il calcolo e il collaudo .....   | 53            |
| 5.6                   | La correzione acustica delle mense .....                    | 54            |
| 5.7                   | La correzione acustica delle palestre e delle piscine ..... | 56            |
| <br><b>CAPITOLO 6</b> | <br><b>Le aule per la musica .....</b>                      | <br><b>59</b> |
| 6.1                   | Le caratteristiche architettoniche degli spazi .....        | 61            |
|                       | Volume, forma e proporzione delle aule .....                | 62            |
| 6.2                   | Il trattamento acustico delle aule .....                    | 63            |
| 6.3                   | L'isolamento acustico delle aule .....                      | 65            |
| <br><b>ALLEGATO</b>   | <br><b>Norme tecniche di riferimento .....</b>              | <br><b>69</b> |
|                       | Norme per il progetto .....                                 | 70            |
|                       | Norme per il collaudo .....                                 | 70            |
|                       | Norme per i valori di riferimento .....                     | 71            |

# PREMESSA



**A**l fine di garantire i requisiti di **benessere acustico** negli **edifici scolastici**, fin dalla progettazione preliminare è necessario prevedere strategie e interventi finalizzati alla riduzione del rumore esterno e alla riduzione del rumore interno per ogni singolo ambiente, ottenuta grazie ad un buon grado di isolamento acustico, al controllo del rumore delle sorgenti interne come gli impianti, e ad una riverberazione ottimale. Tali condizioni sono finalizzate principalmente ad una **buona comprensione verbale tra allievi e insegnanti**.

I parametri acustici di riferimento per i diversi requisiti e i relativi valori ottimali sono riportati nei documenti legislativi e nelle norme tecniche di settore, nazionali e internazionali.

In queste **linee guida si indicano gli aspetti progettuali a cui porre attenzione per soddisfare i requisiti acustici per i diversi ambienti scolastici**, nei quali l'obiettivo principale è l'apprendimento, soprattutto ai livelli iniziali del percorso formativo. Risvolti positivi si hanno anche per gli insegnanti, per i quali la buona acustica riduce i rischi di patologie della voce e della sintomatologia ad esse correlate.

Condizioni acustiche particolarmente restrittive sono previste in caso di allievi con deficit uditivi e con disturbi di attenzione o di linguaggio, e nel caso di allievi non di madrelingua.

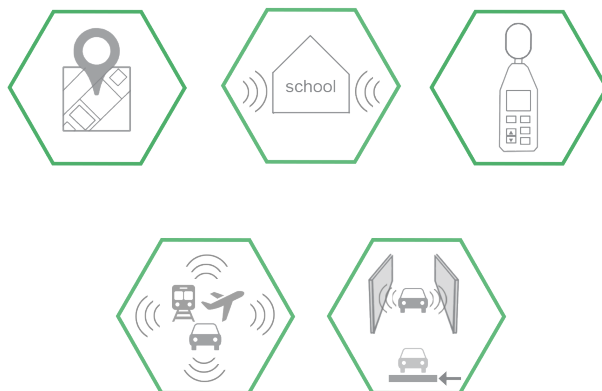
## I CONTENUTI

Al fine di agevolare l'individuazione dei contenuti di ciascun ambito di approfondimento, nella prima pagina di ogni capitolo sono presenti una serie di icone esemplificative. Di seguito se ne riporta la legenda.

|   |   |   |  |   |
|---|---|---|--|---|
|    |    |    |    |    |
| scelta del sito   | rumore dall'esterno   | clima acustico  | rumore e vibrazioni da infrastrutture  | barriere e pavimentazioni acustiche   |
|   |   |   |   |   |
| scuola: forma e collocazione  | distribuzione ambienti interni  | rumore dalla scuola   | serramento vetrato   | porte   |
|  |  |  |  |  |
| pareti di separazione   | solai e rumori impattivi  | giunti di collegamento  | impianti climatizzazione e ventilazione  | impianti idrosanitari   |
|  |  |  |  |  |
| ascensori   | aule didattiche   | pianta aperta e semi-aperta   | aule e problemi di udito   | sale conferenze   |
|  |  |  |  |  |
| amplificazione sonora   | mense: correzione acustica  | palestre e piscine: correzione acustica   | aule musica: architettura  | aule musica: trattamento acustico   |
|  |   |   |  |   |
| aule musica: isolamento acustico  |   |   |  |   |

# 1. IL CONTROLLO DEL RUMORE ESTERNO

## CONTENUTI



GAETANO LICITRA

<https://orcid.org/0000-0003-4867-0954>



La normativa vigente sull'inquinamento acustico è costituita dalla legge quadro n. 447 del 26.10.1995, dai suoi decreti applicativi e dalle norme regionali da essa previste per gli aspetti di competenza delle Regioni, legate in particolare agli aspetti urbanistici. Dal complesso delle norme sopra indicate, deriva come l'edificio scolastico debba sorgere il più lontano possibile da sorgenti di rumore dovute alle infrastrutture di trasporto e alle industrie, al fine di limitare i livelli sonori all'interno della scuola e delle sue pertinenze. Fin dalla fase di progettazione è previsto uno studio preventivo delle condizioni acustiche nell'area dove verrà realizzata la scuola. Tenendo conto del "clima acustico" che risulta dallo studio, il progettista può scegliere opportunamente l'orientamento, la forma e la distribuzione volumetrica dell'edificio.

L'interposizione di fabbricati meno sensibili al rumore, quali magazzini o uffici, a schermatura di edifici con ambienti per la didattica, è una delle possibili strategie per il contenimento del rumore esterno.

Nei casi più critici è possibile prevedere la presenza di barriere acustiche o di elementi territoriali e architettonici che possano fungere da barriere, come colline o terrapieni.

A differenza di quanto comunemente creduto, le barriere vegetali formate da file di alberi non sono soluzioni efficaci, tuttavia possono essere utilizzate come mascheramento di barriere acustiche per migliorarne l'effetto visivo. Occorre sottolineare che le barriere acustiche sono efficaci nella riduzione del rumore alle frequenze medio-alte, piuttosto che alle basse frequenze, per cui l'attenuazione del rumore a bassa frequenza proveniente da mezzi pesanti sarà limitata.

## 1.1 La scelta del sito

Le norme nazionali prevedono che le scuole siano distribuite sul territorio per ridurre la distanza tra le abitazioni degli scolari e la scuola stessa. Tale condizione, che ha indubbi benefici, d'altro canto limita le possibilità di scelta dei luoghi, per cui le scuole inserite nel contesto urbano sono esposte al rumore esterno determinato dalle infrastrutture di trasporto, ma anche da tutte le altre possibili sorgenti antropiche. L'analisi delle condizioni acustiche delle varie aree candidate (studio del "clima acustico") deve portare alla scelta di luoghi in cui sia possibile allontanarsi dalle sorgenti principali di rumore oppure poterle schermare in modo adeguato. Condizioni favorevoli possono essere offerte dalle aree già destinate dal Comune ad ospitare aree scolastiche e indicate come "classe I" in sede di classificazione acustica del territorio (Figura 1.1 e Tabella 1.1). Per tali aree sono previsti valori limite particolarmente contenuti, il cui rispetto garantisce le migliori condizioni di fruibilità degli edifici scolastici. Poiché la disponibilità di tali aree è limitata, soprattutto nelle grandi città, ed aree estese sono ancor più difficili da individuare, occorrerà scegliere aree in classe II, soprattutto nel caso in cui le scuole siano di dimensioni ridotte per le quali la normativa vigente è meno stringente. In generale, comunque, nel caso in cui non vi siano fin da subito condizioni ideali per la collocazione della scuola, è possibile agire con opere di risanamento acustico per mitigare i livelli di inquinamento presente e favorire l'insediamento dei nuovi edifici.

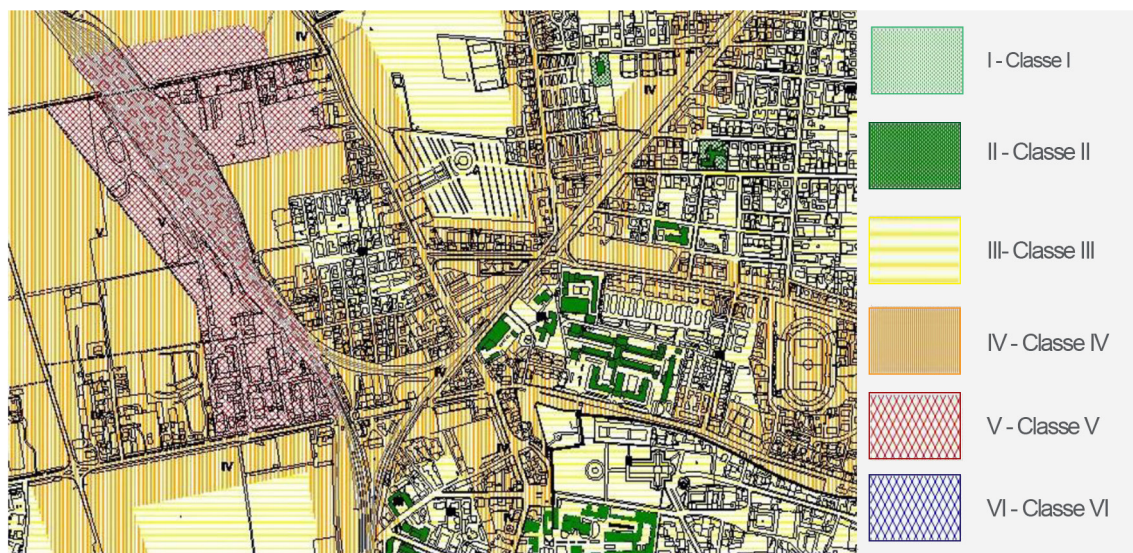


Figura 1.1 Esempio di parte di un piano di classificazione acustica del territorio

Tabella 1.1 Valori limite assoluti di immissione<sup>1</sup> per il rumore in ambiente esterno secondo il D.P.C.M. 14/11/1997

| Classe acustica  | Livello equivalente di pressione sonora ponderata A, $L_{Aeq}$ , in periodo diurno (ore 06 - 22) | Livello equivalente di pressione sonora ponderata A, $L_{Aeq}$ , in periodo notturno (ore 22 - 06) |
|--|--|--|
| <b>Classe I</b><br>aree particolarmente protette   | 50 dB(A)   | 40 dB(A)   |
| <b>Classe II</b><br>aree prevalentemente residenziali (traffico veicolare locale, bassa densità abitativa, assenza di attività industriali ed artigianali)   | 55 dB(A)   | 45 dB(A)   |
| <b>Classe III</b><br>aree di tipo misto (media densità abitativa, attività commerciali ed uffici, limitata presenza di attività artigianali, assenza di attività industriali)  | 60 dB(A)   | 50 dB(A)   |
| <b>Classe IV</b><br>aree di intensa attività umana (alta densità di popolazione, elevata presenza di attività commerciali ed uffici, attività artigianali, in prossimità di strade di grande comunicazione o ferrovie, limitata presenza di piccole industrie) | 65 dB(A)   | 55 dB(A)   |
| <b>Classe V</b><br>aree prevalentemente industriali (insediamenti industriali e scarsità di abitazioni)  | 70 dB(A)   | 60 dB(A)   |
| <b>Classe VI</b><br>aree esclusivamente industriali (prive di insediamenti abitativi)  | 70 dB(A)   | 70 dB(A)   |

<sup>1</sup> *Valore limite di immissione*: valore massimo di rumore che può essere immesso da una o più sorgenti sonore nell'ambiente abitativo o nell'ambiente esterno, misurato in prossimità dei ricettori.

## 1.2 Raccomandazioni per i livelli di rumore all'esterno degli edifici scolastici

Sulla base degli studi condotti a livello internazionale e delle norme vigenti in Italia, il livello sonoro ritenuto accettabile per l'insediamento di nuovi edifici scolastici è di 50 dB(A) durante il giorno, come livello equivalente per l'intero periodo diurno dalle ore 6 alle ore 22. Tale livello sonoro rappresenta un valore di energia media relativa ad un lungo periodo, ma è opportuno che nello stesso tempo non vi siano, se non occasionali, eventi sonori di breve durata ed elevato livello, quali sorvoli di aerei a breve distanza, o passaggi di treni ad alta velocità. Tali fenomeni, ancorché di breve durata, possono essere particolarmente fastidiosi ed ostacolare la piena fruizione delle lezioni. Le norme vigenti non prevedono limiti specifici per essi, se non in maniera indiretta limitandone il numero attraverso il contenimento dell'energia media durante il periodo.

### 1.3 Il clima acustico

Lo studio del clima acustico dell'area deve prevedere la descrizione dei livelli sonori presenti attraverso misure specifiche e di durata opportuna, l'individuazione delle sorgenti che determinano i livelli sonori rilevati, la verifica dei valori limite da applicare sulla base della classificazione acustica del territorio. Seppure ogni regione abbia legiferato in materia, possono essere qui fornite indicazioni di livello generale per i contenuti della relazione previsionale di clima acustico, che - redatta da un tecnico competente in acustica, l'unico abilitato per legge - deve dimostrare attraverso un'adeguata completezza documentale:

- la corrispondenza delle assunzioni tecniche con le leggi fisiche che regolamentano i fenomeni acustici stante i luoghi e la tipologia dell'insediamento interessato;
- il rispetto delle norme di buona tecnica nelle misure e nelle elaborazioni per la previsione o valutazione dei livelli sonori;
- il rispetto dei limiti di legge vigenti, ovvero dimostrare l'efficacia degli interventi di mitigazione eventualmente necessari/previsti.

Gli elementi indispensabili che deve contenere la valutazione previsionale di clima acustico sono:

1. una planimetria fedele della situazione attuale dell'area, dove si localizza il progetto, che consenta di individuare le principali sorgenti sonore che influenzano il clima acustico dell'area;
2. la valutazione del clima acustico presente prima della realizzazione dell'opera, tenendo conto della variabilità delle sorgenti presenti, attraverso calcoli e/o misure dei livelli sonori in corrispondenza dei nuovi ricettori;
3. la descrizione della classificazione acustica del territorio dove si realizzerà il nuovo insediamento;
4. un'analisi delle modificazioni prodotte dalla realizzazione dell'opera sulle sorgenti

sonore precedentemente individuate e sulla propagazione acustica verso i ricettori, inclusi gli effetti di schermo, riflessione e simili introdotti dalla realizzazione dell'insediamento stesso;

5. l'individuazione delle modificazioni dei percorsi e dei flussi di traffico prodotte a regime dall'insediamento previsto;

6. la descrizione delle prestazioni di isolamento acustico verso i rumori esterni offerte dall'edificio oggetto di valutazione e la conformità delle stesse a quanto disposto dalla legge;

7. nel caso che i livelli sonori previsti siano superiori ai limiti, una analisi dei possibili interventi per ricondurre i livelli sonori entro i limiti previsti agendo prioritariamente sulle vie di propagazione del rumore;

8. una stima dei costi necessari per la realizzazione degli interventi di mitigazione proposti.

## 1.4 Il rumore e le vibrazioni dovuti a infrastrutture stradali, ferroviarie e aeroportuali

Il rumore prodotto dalle infrastrutture di trasporto è pressoché ubiquitario; in particolare è presente nelle aree densamente abitate ed è la principale causa di disturbo da rumore in Europa. La stessa scuola è attrattore di traffico, per cui l'inquinamento derivante è ineludibile, ancorché si possa e si debba mitigarlo con mezzi tecnici, ma anche organizzativi, pianificatori e con l'educazione ambientale. Quest'ultima è importante per spingere i cittadini a limitare l'uso dei mezzi di trasporto a motore privato, privilegiando quelli collettivi, i mezzi ecologici, prima di tutto la bicicletta, oltre che per promuovere gli spostamenti a piedi, stante anche la prossimità delle scuole alle abitazioni dei suoi fruitori.

La vicinanza a sorgenti ferroviarie e aeroportuali va evitata, soprattutto per la natura stessa dei fenomeni sonori da esse determinate. Infatti, eventi sonori di elevata energia, seppur di breve durata, sono particolarmente disturbanti, creando distrazione in aula, mascherando la voce degli insegnanti ed interferendo negativamente con l'apprendimento (Figura 1.2).

Il rumore si propaga attraverso onde sonore ed è in grado di far vibrare strutture e superfici, anche estese e di grande massa, in funzione della sua intensità e frequenza. L'intensità delle vibrazioni dipende, tra l'altro, dalle sorgenti di rumore in gioco, dalla distanza tra sorgente e ricevitore, dalle caratteristiche delle strutture vibranti e da quelle del terreno in cui le vibrazioni si trasmettono. Vibrazioni strutturali sono generate soprattutto dal traffico stradale pesante e da quello ferroviario, mentre il traffico aeroportuale può indurre le vibrazioni delle finestre e dei loro vetri.

Le vibrazioni hanno un effetto moltiplicativo sul disturbo prodotto dall'inquinamento acustico e pertanto vanno mitigate, anche per evitare danni strutturali nelle situazioni particolarmente critiche.

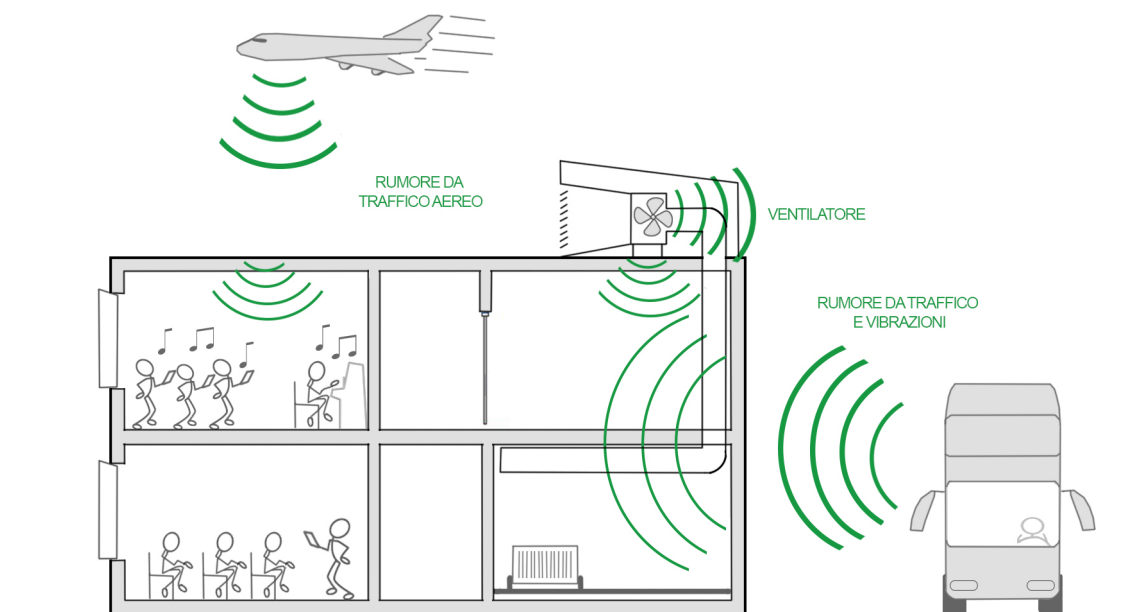


Figura 1.2 Esempi di rumori e vibrazioni provenienti dall'ambiente esterno

## 1.5 Le barriere acustiche e gli interventi sulle pavimentazioni stradali

**A**l fine di ridurre il rumore provocato da infrastrutture di trasporto terrestri (strade e ferrovie) o anche industriali o comunque artigianali e commerciali, le barriere acustiche possono fornire una mitigazione del disturbo efficace se opportunamente dimensionate e montate. È cruciale infatti non solo il materiale di cui sono composte, ma anche la loro corretta collocazione e realizzazione. L'effetto diffrattivo sulle onde sonore fa sì che nell'ombra acustica della barriera si possano ottenere riduzioni significative del livello sonoro, fino a 8 - 10 dB(A), che a loro volta dipendono dalle reciproche posizioni della sorgente e del ricevitore. Per il loro dimensionamento vengono utilizzati modelli matematici di provata validità in grado di stabilire la posizione e la dimensione ottimale.

L'inserimento delle barriere è cruciale per la loro accettabilità, soprattutto in ambito urbano. Esiste una moltitudine di forme e di caratteristiche dei materiali che, se opportunamente scelti, migliorano l'impatto visivo. La mimetizzazione delle barriere, attraverso l'utilizzo di vegetazione o la scelta di materiali naturali e/o riciclati, rappresenta la nuova frontiera della ricerca per rendere meno "artificiale" il loro inserimento nell'ambiente e nel contempo dando ai materiali nuove opportunità di impiego a fine vita (Figura 1.3). La durata della vita di servizio delle barriere può arrivare a diversi decenni con una minima manutenzione.

Le barriere acustiche sono particolarmente rilevanti quando utilizzate per isolare o comunque migliorare la qualità sonora degli ambienti aperti ed esterni alla scuola (giardini, spazi sportivi, ecc.) in quanto in queste pertinenze rappresentano di fatto una delle poche soluzioni praticabili. Nel caso di scuole con affaccio diretto sulla sede stradale, la



barriera non può essere collocata e, al di là di interventi diretti sulle finestre (descritti nel capitolo 3), diventa necessario agire sulla sorgente sonora, rappresentata dal traffico stradale. Se le velocità in gioco sono mediamente superiori ai 35 chilometri all'ora e/o se il traffico non è interrotto da passaggi pedonali, semafori e dissuasori di velocità, il rumore di rotolamento risulta preponderante su quello del motore del veicolo e ha senso agire sulle caratteristiche delle pavimentazioni stradali.

Numerosi interventi sono stati realizzati utilizzando nuove tipologie di pavimentazioni, quali quelle fonoassorbenti (Figura 1.4) o a bassa emissione, il cui beneficio può essere di 3 - 5 dB(A) al bordo strada rispetto alle pavimentazioni preesistenti, anche avuto riguardo alle loro caratteristiche e allo stato di manutenzione.

Le prime hanno lo scopo di assorbire il rumore prodotto attraverso uno strato di usura che abbia un'alta percentuale di vuoti. Purtroppo, in ambito urbano tali pavimentazioni si degradano nel tempo se non si attua un'adeguata pulitura per asportare il materiale che occlude i pori.

Le seconde (pavimentazioni a bassa emissione) sono costituite da materiali particolari, quali bitumi modificati con l'aggiunta di polverino di gomma, o hanno una superficie caratterizzata da una distribuzione spaziale particolare del materiale inerte (tessitura ottimizzata), attraverso la scelta opportuna della granulometria del materiale che costituisce lo strato di usura. Questo tipo di pavimentazioni essendo chiuse e non porose non hanno i problemi di decadimento delle prestazioni delle prime e possono garantire in presenza di una velocità media sostenuta e comunque superiore ai 35 chilometri all'ora prestazioni analoghe alle pavimentazioni fonoassorbenti. È tuttavia ancora in fase di valutazione la durata effettiva della loro vita di servizio.



Figura 1.3 Esempio di barriera acustica mimetizzata con il verde



Figura 1.4 Esempio di pavimentazione fonoassorbente

# 2.

## LA RELAZIONE TRA EDIFICIO SCOLASTICO E SORGENTI DI RUMORE

---

### CONTENUTI

---



---

SIMONE SECCHI

<https://orcid.org/0000-0002-8539-1578>

---



## 2.1. La collocazione e la forma dell'edificio scolastico

La necessità di prevenire condizioni di inquinamento acustico, come prima riportato, ha condotto all'obbligo normativo di effettuare una valutazione preventiva di clima acustico, il cui esito può avere influenza sull'orientamento, sulla forma e sulla distribuzione volumetrica dell'edificio.

L'interposizione di fabbricati meno sensibili al rumore, quali magazzini o uffici, per la schermatura di edifici con ambienti per la didattica, è una delle possibili strategie per il controllo del rumore esterno. Per limitare il rumore esterno nei casi più critici è possibile prevedere la presenza di barriere acustiche o di elementi territoriali e architettonici che possano fungere da barriere, come colline o terrapieni (si veda anche capitolo 1). Le barriere vegetali formate da file di alberi non sono soluzioni efficaci, tuttavia possono essere utilizzate come mascheramento di barriere acustiche per migliorarne l'effetto visivo.

### Sistemazione orografica del territorio

Per ostacolare la propagazione del rumore sulle facciate degli edifici, là dove la conformazione del terreno lo permetta e ci sia sufficiente terreno libero tra la sorgente e l'edificio, si possono erigere terrapieni di altezza adeguata all'entità del problema acustico (calcolati in base alla tipologia ed elevazione dei volumi da proteggere) o, viceversa, ribassare lo spazio costruito rispetto al piano stradale, compatibilmente al soddisfacimento dei requisiti termici e visivi che concorrono, con quelli acustici, a dare agli ambienti scolastici il giusto grado di comfort. Per quanto concerne la sistemazione a verde dei terrapieni, mentre sulle fiancate si possono impiantare specie vegetali adatte a filtrare rumori e polveri, sul loro coronamento dovrà esserci solo un manto erboso, onde evitare una possibile dispersione del rumore nella zona schermata (Figura 2.1).

### Orientamenti progettuali

Una corretta disposizione planivolumetrica dell'edificio scolastico rispetto alle vie di traffico è il primo passo verso la protezione dal rumore.

In linea di principio, gli edifici a corte proteggono meglio le aree interne, rendendo possibile l'utilizzo delle stesse per destinazioni acusticamente più sensibili. Essi però possono presentare facciate maggiormente esposte al rumore, per cui è necessario adottare un'opportuna distribuzione degli spazi interni, prevedendo possibilmente di destinare le zone più esposte a funzioni meno sensibili al rumore (corridoi, magazzini ecc.).

Una possibile tipologia planivolumetrica volta al contenimento del disturbo da traffico veicolare è quella a volumi sfalsati (gradoni). La riduzione del livello sonoro è qui ottenuta tramite il progressivo arretramento del fronte edificato, con elevazione, dalla via di traffico; gli spazi terrazza così ottenuti possono poi venire opportunamente protetti con l'inserimento di parapetti di muratura piena e continua, mentre i blocchi posti al piano terreno potranno essere destinati ad usi meno sensibili al rumore (Figura 2.2).

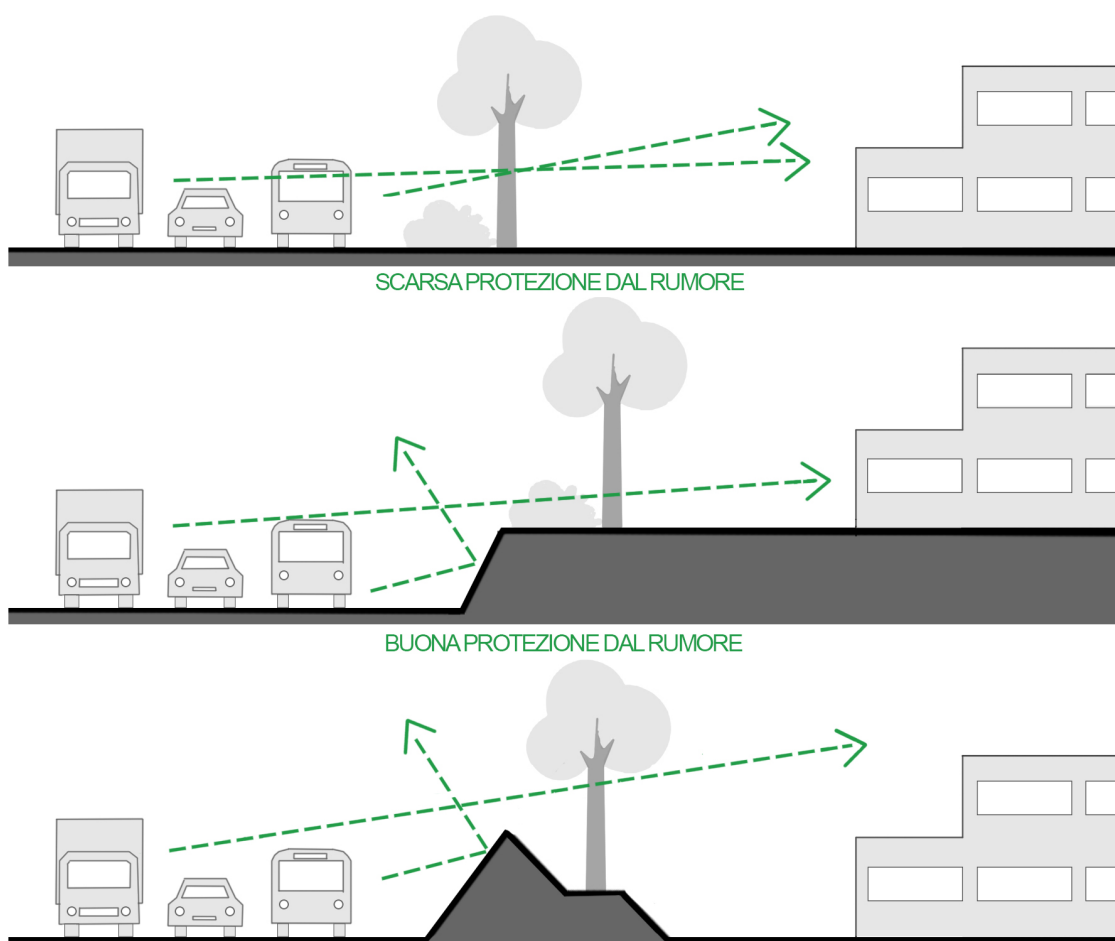


Figura 2.1 Uso di terrapieni ed essenze vegetali come schermi acustici

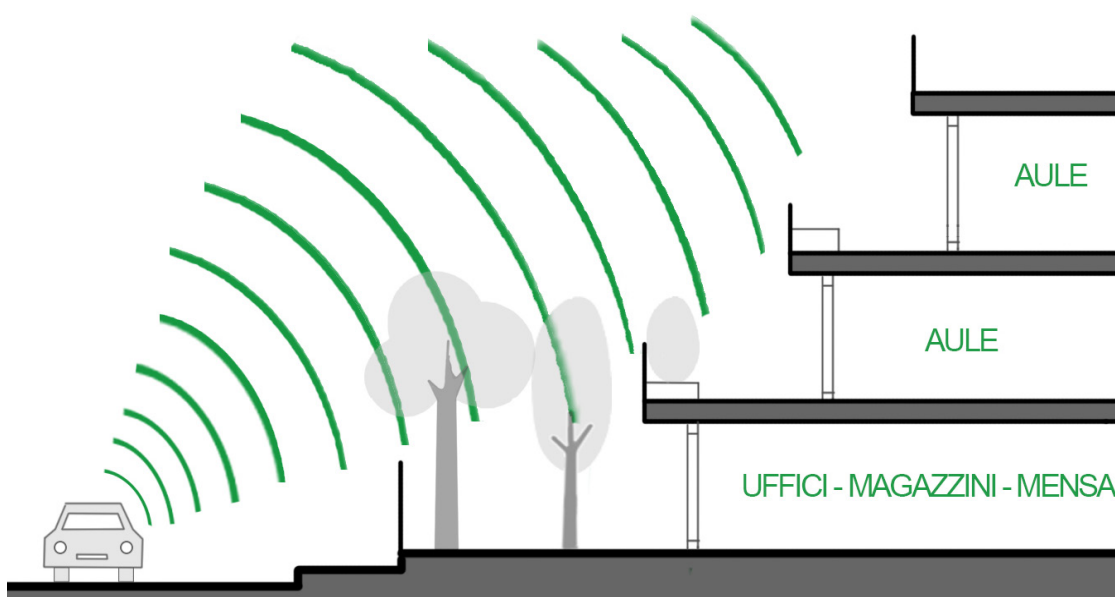


Figura 2.2 Conformazione dell'edificio a gradoni per favorire la protezione degli ambienti sensibili al rumore

Ulteriore attenzione va posta nel disporre i volumi rispetto alla via, ossia è buona norma sistemare la costruzione con la dimensione maggiore parallela al tracciato viario, a formare una cortina muraria, per quanto possibile continua (compatibilmente con gli spazi di accesso alle aree). Al contrario, una disposizione a blocchi perpendicolari rispetto alla strada fa sì che il rumore ivi prodotto attraversi completamente le aree libere di pertinenza della scuola e che si producano così effetti di riverberazione sulle facciate, esponendo in toto gli ambienti interni al rumore. La chiusura di tali ambiti per mezzo di muri di recinzione sufficientemente alti e fonoisolanti, ricostituenti la cortina muraria di cui sopra, limiterebbe in questo caso la propagazione del rumore.

Offrono una buona protezione acustica quelle progettazioni che prevedono di anteporre ai lotti costruiti una fascia di terreno occupata da edifici di servizio, quali locali deposito/magazzino, locali tecnici, garage (Figura 2.3).

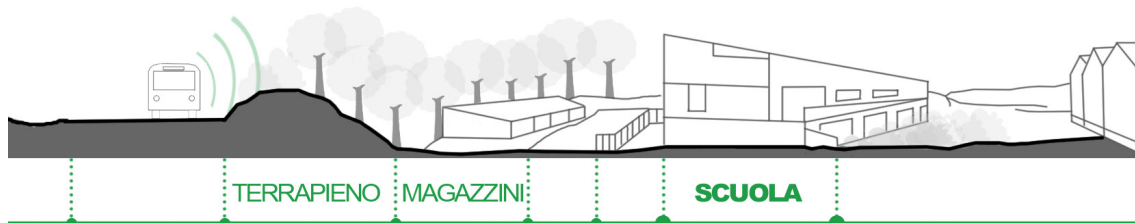


Figura 2.3 Distribuzione dei corpi di fabbrica per proteggere gli ambienti più sensibili al rumore

Sono invece da evitare tutte quelle disposizioni planivolumetriche che favoriscono la riverberazione del rumore, quali quelle a corte aperta verso la strada, o miste, nelle quali i corpi di fabbrica formano fra loro delle concavità. Qui il disturbo acustico interessa sia i fronti che le testate degli edifici divenendo di difficile gestione e contenimento (Figura 2.4).

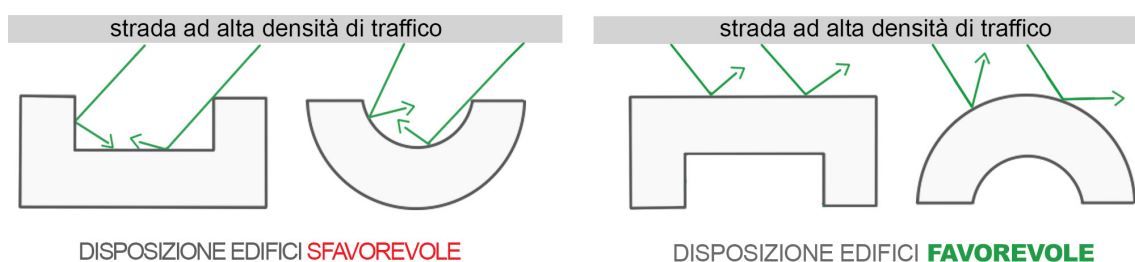


Figura 2.4 Forme dell'edificio favorevoli e sfavorevoli ai fini della protezione dal rumore

Anche la forma della facciata degli edifici, la capacità di assorbimento acustico di superfici aggettanti quali balconi, logge o frangisole e la direzione del campo sonoro, possono favorire l'attenuazione del rumore immesso verso i locali interni dell'edificio.

In linea di massima, la disposizione volumetrica che offre il riparo migliore dal rumore prodotto dal traffico è sicuramente quella a blocchi chiusi; l'attenuazione dei livelli di pressione sonora misurabile nei cortili interni così ottenuti, a seconda dell'altezza dei fronti, è dell'ordine di 20 dB (Figura 2.5).

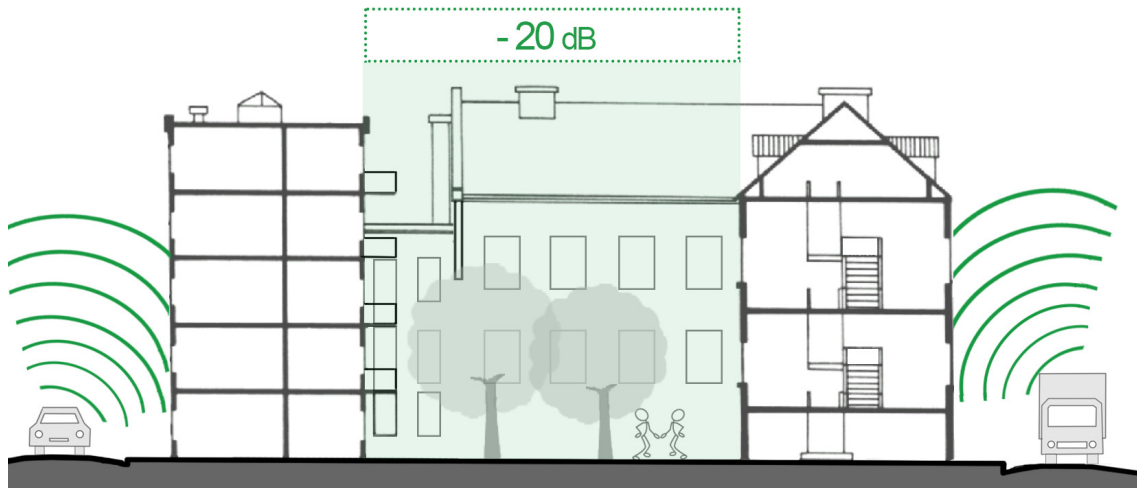


Figura 2.5 Conformazione a corte chiusa dell'edificio a proteggere gli ambienti interni dal rumore

## 2.2. La distribuzione degli ambienti interni dell'edificio in relazione alle sorgenti di rumore

Per ridurre l'impatto del rumore esterno sulle funzioni primarie, che si svolgono nell'edificio scolastico, è bene anteporre gli spazi interni meno sensibili al rumore (quali blocchi scala, ascensori, servizi igienici e locali di servizio, lavanderie, depositi ecc.) alle aule. Ciò deve comunque avvenire nel rispetto dei necessari requisiti di soleggiamento, illuminazione naturale e ventilazione naturale degli ambienti scolastici.

Per ridurre la propagazione dei rumori generati all'interno dell'edificio è inoltre opportuno separare gli ambienti con bassa tolleranza al rumore, come le aule per la didattica tradizionale, dagli ambienti particolarmente rumorosi, come le palestre e le aule per attività musicali e ricreative, mediante spazi cuscinetto come magazzini (per gli strumenti musicali, per attrezzature sportive o altro), corridoi o zone neutre di passaggio non particolarmente rumorose e sensibili al rumore.

Le porte di accesso agli ambienti didattici devono essere fonoisolanti e non adiacenti nel caso di ambienti didattici posti sullo stesso lato dell'edificio, non fronteggiarsi, nel caso di ambienti didattici contrapposti.

## 2.3 Il rumore delle scuole verso gli edifici adiacenti

La scuola, oltre che essere edificio da proteggere dal rumore esterno, può essere la stessa causa di disturbo. Ciò perché la scuola è un attrattore di traffico ed è normalmente dotata di impianti meccanici (frigoriferi, condizionatori, ecc.) che, se non correttamente progettati e realizzati, possono disturbare i residenti delle abitazioni vicine in funzione della loro collocazione (Figura 2.6). Infine, le attività ludiche e sportive possono essere fonte di disturbo quando la scelta delle aree dove esse sono praticate non è idonea. In sede di progettazione degli spazi esterni, quindi, occorre valutare sia la

necessità di renderli pienamente vivibili proteggendoli dal rumore stradale o ferroviario, sia quella di non localizzarli a ridosso di civili abitazioni. Nel caso di scuole inserite in edifici ad uso promiscuo, altro problema è il rumore prodotto all'interno della scuola dai suoi stessi occupanti, che può propagarsi anche per via strutturale verso le altre parti dell'edificio e presso gli edifici confinanti strutturalmente.

La valutazione previsionale del rumore immesso dalle scuole verso gli ambienti circostanti o verso altri ambienti interni a diversa destinazione può essere effettuata mediante le norme della serie UNI EN 12354. In particolare, la parte 4 di questa serie di norme consente il calcolo della propagazione del rumore prodotto all'interno di un edificio verso gli ambienti esterni circostanti.

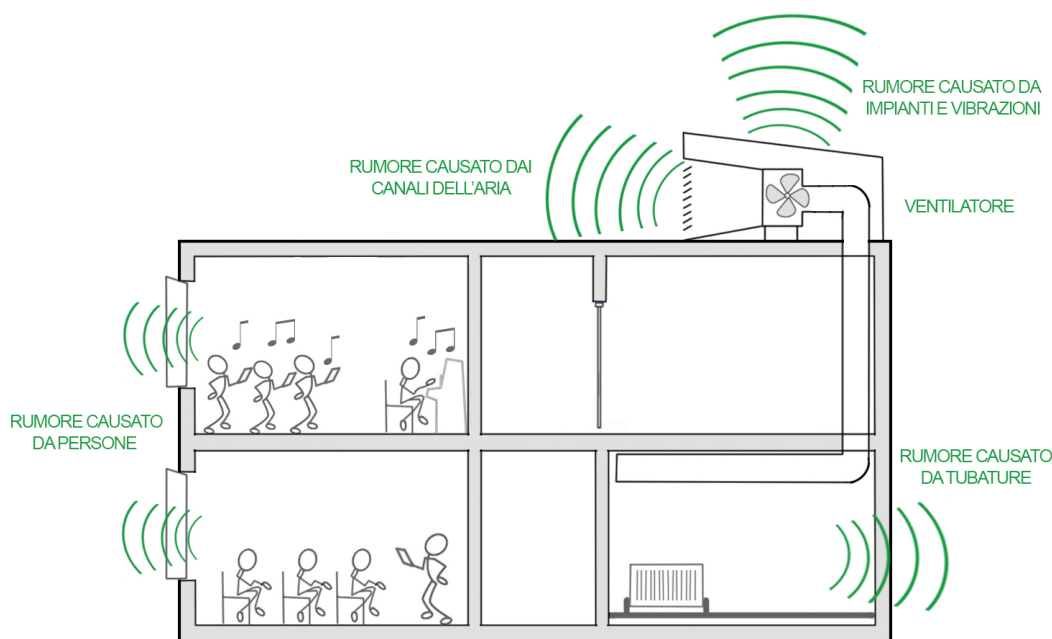


Figura 2.6 Esempio di rumori e vibrazioni emesse dalla scuola verso l'esterno

# 3. IL FONOISOLAMENTO

## CONTENUTI



LUCA BARBARESI

<http://orcid.org/0000-0002-9515-7128>

ANTONINO DI BELLA

<http://orcid.org/0000-0002-0842-1198>

PATRIZIO FAUSTI

<http://orcid.org/0000-0003-3851-3410>

Una progettazione efficace del fonoisolamento richiede un'attenzione complessiva alla trasmissione sonora attraverso tutti gli elementi che costituiscono l'edificio, senza trascurare gli elementi acusticamente deboli, come le finestre e le porte, e i piccoli elementi quali le bocchette di ventilazione o altri tipi di aperture, che possono compromettere le prestazioni delle partizioni su cui sono inseriti. A questo si aggiunge l'importanza della posa in opera che, se non eseguita a regola d'arte, può determinare la presenza di "ponti acustici" di difficile eliminazione a fine lavori.

I valori di riferimento per i requisiti acustici degli edifici scolastici sono reperibili nella norma UNI 11367, fermi restando i valori limite previsti dalla legislazione vigente. La norma UNI 11367 contiene indicazioni sui requisiti prestazionali definiti "di base" e "superiori". Sono pertanto forniti specifici valori di riferimento per vari descrittori dell'isolamento acustico come, ad esempio, l'isolamento acustico di facciata, il potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti, l'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo collegati mediante accessi (Tabelle 3.1 e 3.2). Nella norma viene inoltre specificato che il livello sonoro immesso da un impianto a servizio di un aula o di aule polifunzionali separate da strutture mobili, deve essere valutato all'interno di ambienti acusticamente verificabili diversi dall'ambiente servito.

Tabella 3.1 Requisiti acustici delle scuole secondo la UNI 11367: prestazioni di base e superiori

| Requisito  | Prestazione di base | Prestazione superiore |
|--|---------------------|-----------------------|
| Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di facciata, $D_{2m,nT,w}$ [dB]  | $\geq 38$           | $\geq 43$             |
| Descrittore del potere fonoisolante apparente di partizioni fra ambienti di differenti unità immobiliari, $R'_w$ [dB]  | $\geq 50$           | $\geq 56$             |
| Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti di differenti unità immobiliari, $L'_{nw}$ [dB]                               | $\leq 63$           | $\leq 53$             |
| Livello sonoro corretto immesso da impianti a funzionamento continuo, $L_{ic}$ in ambienti diversi da quelli di installazione [dB(A)]                            | $\leq 32$           | $\leq 28$             |
| Livello sonoro massimo corretto immesso da impianti a funzionamento discontinuo, $L_{id}$ in ambienti diversi da quelli di installazione [dB(A)]                 | $\leq 39$           | $\leq 34$             |
| Livello sonoro immesso da impianti a funzionamento continuo, $L_{Aeq,nT}$ all'interno delle aule, biblioteche, ecc. (requisito derivante dalla UNI 8199) [dB(A)] | $\leq 35$           | $\leq 30$             |

|   |           |           |
|---|-----------|-----------|
| Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$ [dB]      | $\geq 50$ | $\geq 55$ |
| Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato di partizioni fra ambienti adiacenti della stessa unità immobiliare, $D_{nT,w}$ [dB]        | $\geq 45$ | $\geq 50$ |
| Descrittore del livello di pressione sonora di calpestio normalizzato fra ambienti sovrapposti della stessa unità immobiliare, $L'_{nw}$ [dB] | $\leq 63$ | $\leq 53$ |

Tabella 3.2 Requisiti acustici delle scuole secondo la UNI 11367: prestazioni di isolamento rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo

| Livello prestazionale | Descrittore dell'isolamento acustico normalizzato rispetto ad ambienti di uso comune o collettivo collegati mediante accessi o aperture, $D_{nT,w}$ [dB] |
|-----------------------|--|
| Prestazione ottima    | $\geq 34$  |
| Prestazione buona     | $\geq 30$  |
| Prestazione di base   | $\geq 27$  |
| Prestazione modesta   | $\geq 23$  |

Nella scelta dei requisiti prestazionali di riferimento, va comunque considerata la destinazione d'uso dei specifici ambienti. In particolare, una progettazione attenta deve tenere conto della distribuzione interna dei vari spazi separando, mediante corridoi o disimpegni, le aule per la didattica tradizionale dagli ambienti particolarmente rumorosi, come le palestre e le aule per attività musicali e ricreative.

Le prestazioni in opera degli stessi componenti edilizi possono essere determinate seguendo le metodologie di calcolo descritte nelle norme della serie UNI EN 12354. Per esempi specifici relativi alla tipologia costruttiva italiana si rimanda alla norma UNI/TR 11175. L'utilizzo di questi metodi di calcolo presuppone la conoscenza delle caratteristiche acustiche dei singoli elementi costruttivi scelti.

Di seguito viene riportato un elenco, non esaustivo, dei componenti edilizi a cui prestare attenzione in fase di progettazione:

1. serramento vetrato;
2. porte;
3. pareti di separazione fra ambienti;
4. solai;
5. giunti di collegamento tra le strutture.



### 3.1 Il serramento vetrato

Il serramento vetrato, che rappresenta la parte più debole della facciata, è comprensivo di vetro, telaio ed eventualmente cassonetto per l'avvolgibile. Il numero di ante, le dimensioni dell'infisso, la tipologia del telaio e del vetro sono alcuni dei parametri che influenzano il potere fonoisolante globale del serramento.

Attraverso le norme UNI/TR 11175 e UNI EN 14351-1 è possibile determinare il potere fonoisolante dell'infisso nella sua globalità noto il potere fonoisolante del vetro.

Le caratteristiche fonoisolanti di un serramento vetrato dipendono fortemente dalla tenuta all'aria del telaio perimetrale e a tal scopo è necessario prevedere serramenti ad elevata tenuta all'aria, come indicato nelle norme UNI EN 12207 e UNI EN 12152.

I cassonetti devono essere ottimizzati dal punto di vista del fonoisolamento, per non portare a riduzioni elevate dell'isolamento acustico dell'intera facciata.

Nella norma UNI 11296 sono riportati gli schemi di posa in opera dei telai e le prescrizioni necessarie affinché l'infisso possa garantire una corretta mitigazione del rumore proveniente dall'esterno.

In presenza di prese d'aria di ventilazione, per non compromettere le prestazioni acustiche dell'intera facciata, è necessario adottare bocchette con elevate capacità di attenuazione sonora (eventualmente mediante l'inserzione di appositi silenziatori).

### 3.2 Le porte

Il potere fonoisolante delle porte è determinato dalla combinazione delle prestazioni acustiche del telaio e del pannello che costituisce la porta. Oltre alla tipologia del tamponamento, le prestazioni acustiche della porta dipendono fortemente dalla qualità della guarnizione lungo il perimetro. Occorre poi ricordare che piccoli dettagli quali le soglie e le parti vetrate possono comprometterne le qualità fonoisolanti.

Le porte esterne rappresentano, insieme al serramento vetrato, gli elementi deboli di facciata. Per l'ottimizzazione delle prestazioni acustiche e della posa in opera è consigliabile riferirsi, anche per le porte esterne, alle prescrizioni contenute nella norma UNI 11296.

Anche le prestazioni delle porte interne sono determinanti per un corretto isolamento degli ambienti sensibili al rumore, come le aule didattiche, dai rumori provenienti da spazi comuni e corridoi. Nei casi di ambienti particolarmente sensibili o rumorosi, come le aule di musica, possono essere necessarie soluzioni più performanti ottenibili tramite l'installazione di porte doppie separate da un'intercapedine resa fonoassorbente mediante installazione di pannelli porosi/fibrosi.

Anche per le porte interne, in presenza di prese d'aria di ventilazione, è necessario adottare bocchette con elevate capacità di attenuazione sonora.

### 3.3 Le pareti di separazione fra ambienti

Per le pareti di separazione fra ambienti adiacenti possono essere adottate stratigrafie leggere o a secco (come pareti in cartongesso, CLT, struttura a telaio in legno) o pesanti (pareti in muratura). La scelta della stratigrafia deve essere effettuata con il fine di rispettare i requisiti di fonoisolamento previsti fra i diversi ambienti per la didattica tenendo presente che non è la sola parete di separazione a determinare la quota di suono trasmesso tra un ambiente e quello adiacente, bensì l'intero sistema di elementi che sono connessi alla parete di separazione. Nel caso di partizione verticale tra due aule adiacenti, ad esempio, la trasmissione diretta avviene attraverso la parete di separazione, mentre la trasmissione laterale avviene attraverso i solai superiore e inferiore, la parete verso il corridoio e la facciata esterna (Figura 3.1).

La scelta della partizione di separazione, sia essa verticale (parete) che orizzontale (solaio), deve essere fatta tenendo in considerazione il tipico comportamento in frequenza del potere fonoisolante della maggior parte dei componenti edilizi. La frequenza di risonanza e la frequenza di coincidenza non devono trovarsi in corrispondenza del tipico spettro medio di emissione della voce umana. Per il calcolo del potere fonoisolante in opera e dell'isolamento acustico si può utilizzare la parte 1 della norma UNI EN 12354; i valori di riferimento sono sempre contenuti nella UNI 11367 (si veda Tabelle 3.1 e 3.2).

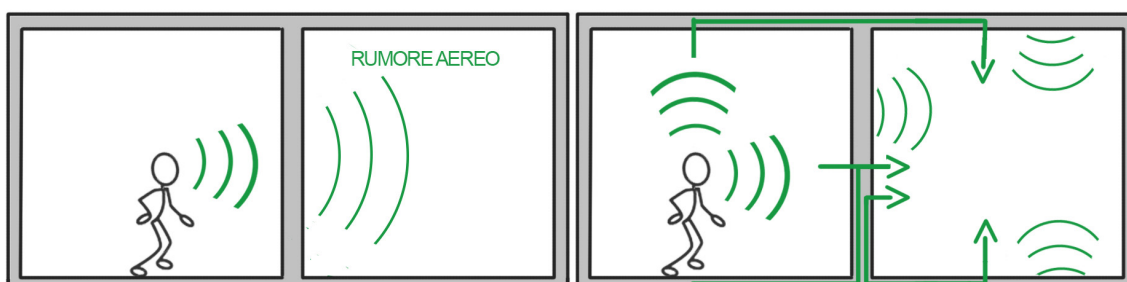


Figura 3.1 Trasmissione diretta (a sinistra) e laterale (a destra) tra due ambienti adiacenti

### 3.4 I solai e i rumori impattivi

L'attenuazione del rumore impattivo (dovuto al calpestio, ad impatti sul solaio, al trascinarsi di arredi) si può conseguire realizzando un massetto galleggiante. La trasmissione avviene attraverso il solaio e le pareti laterali (Figura 3.2). L'utilizzo di pavimentazioni resilienti può costituire un'opera di mitigazione nella trasmissione del rumore impattivo, ma la sua efficacia è limitata.

Il massetto galleggiante è costituito da un pacchetto che si appoggia sul solaio portante (o sul massetto alleggerito di livellamento a copertura degli impianti) che si compone, a partire dal solaio grezzo, da uno strato di materiale resiliente sul quale si sovrappone una piastra costituita da un massetto tradizionale o a secco, sulla quale viene infine applicata la pavimentazione. Il massetto e il pavimento sono realizzati in modo da "galleggiare" sul solaio portante tramite lo strato resiliente, escludendo ogni collega-

mento rigido con il solaio.

Sono molti i fattori che possono avere influenza sulla prestazione in opera di un massetto galleggiante, ed alcuni sono determinanti al fine di ottenere i risultati attesi: la buona realizzazione dei giunti tra elementi orizzontali e verticali, la posa del massetto alleggerito e del massetto ripartitore, la posa dello strato resiliente, del pavimento e del battiscopa (Figura 3.3). Per il calcolo del potere fonoisolante in opera e dell'isolamento acustico di calpestio si possono utilizzare la parte 1 e 2 della norma UNI EN 12354.

Per una corretta posa in opera di un massetto galleggiante è necessario verificare che il massetto di livellamento a copertura degli impianti sia privo di asperità superficiali e che il sottofondo sia posato in modo da non presentare discontinuità.

Le indicazioni per la corretta composizione e posa del massetto galleggiante sono contenute nella norma UNI 11516.

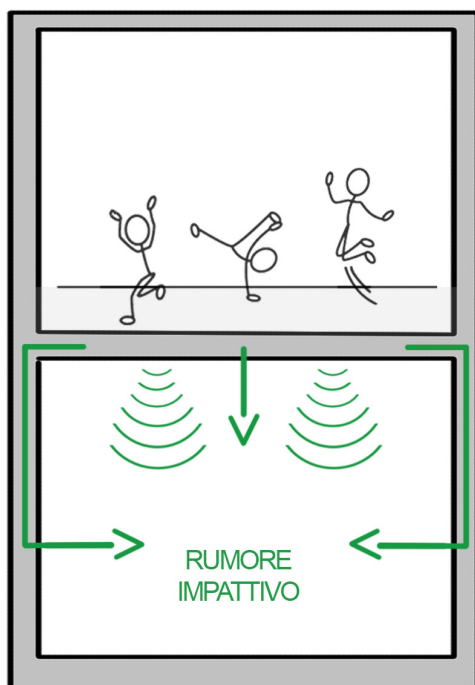


Figura 3.2 Esempio di trasmissione del rumore impattivo

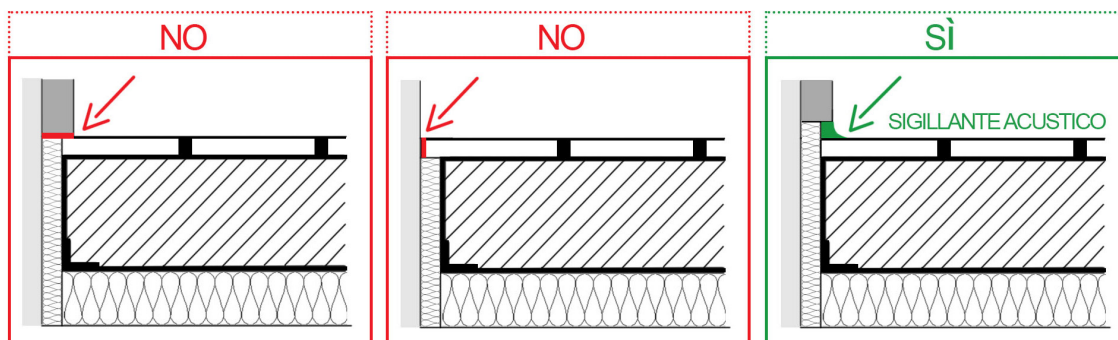


Figura 3.3 Esempi di realizzazione non corretta o corretta del massetto galleggiante

### 3.5 I giunti di collegamento tra le strutture

Il potere fonoisolante e l'isolamento dei rumori impattivi di una partizione in opera esprimono la quantità di energia sonora trasmessa nelle condizioni reali di utilizzo prendendo in considerazione, oltre alla trasmissione diretta attraverso la partizione, anche gli eventuali percorsi di trasmissione aerea e di trasmissione laterale dovuti alle strutture adiacenti la partizione. Pertanto nel calcolo delle prestazioni acustiche di una parete o di un solaio bisogna valutare anche l'effetto di queste altre vie di propagazione del rumore.

I principali percorsi di trasmissione laterale sono codificati nella norma UNI EN 12354 parte 1. Il calcolo corretto può essere effettuato solo se si conoscono le tipologie di giunti di collegamento tra le strutture e tutte le caratteristiche fisiche ed acustiche degli elementi costruttivi connessi alla partizione di separazione tra due ambienti.

La trasmissione laterale del suono tra due ambienti adiacenti può essere ridotta intervenendo in diversi modi (Figure 3.4 e 3.5):

- aumentando la massa degli elementi connessi alla parete di separazione lungo i quali ci possa essere trasmissione laterale del suono;
- introducendo discontinuità sul percorso di trasmissione laterale, ad esempio proseguendo la parete di separazione oltre la linea del giunto;
- realizzando prima la parete di separazione e poi il controsoffitto ed evitando la presenza di un controsoffitto continuo tra due ambienti che oltrepassi la parete di separazione;
- applicando una controparete fonoisolante all'elemento laterale per incrementarne il potere fonoisolante;
- realizzando il massetto galleggiante dopo aver posto in opera le pareti di separazione, interrompendo così la trasmissione del rumore lungo il massetto comune a tutti gli ambienti.

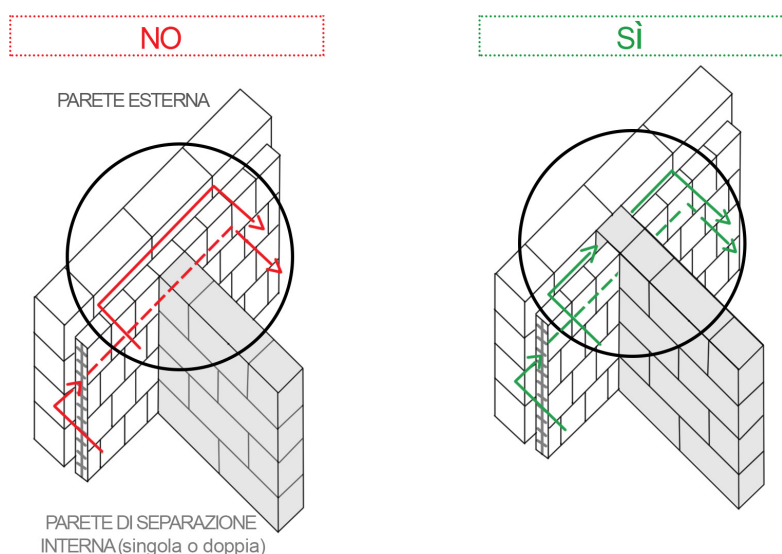


Figura 3.4 Esempio di realizzazione non corretta o corretta del giunto tra parete laterale doppia e parete di separazione

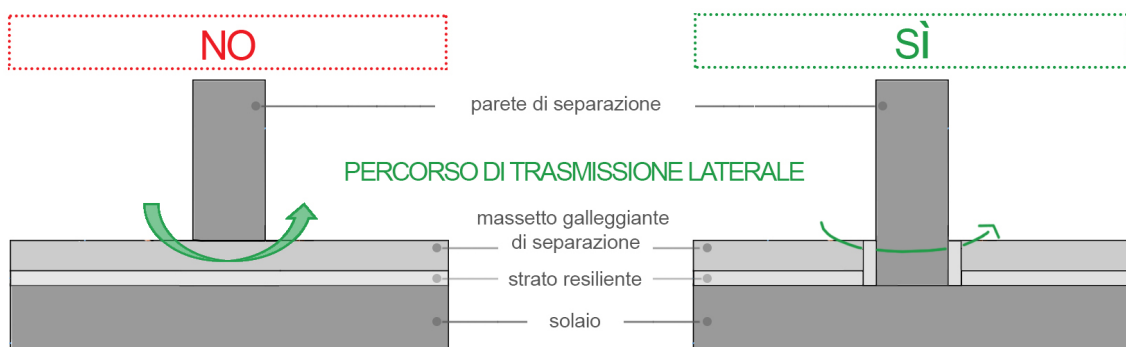


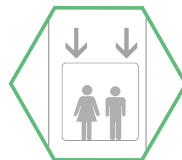
Figura 3.5 Esempio di errata realizzazione del giunto tra parete e solaio in presenza del massetto di galleggiante (a sinistra). Esempio di corretta realizzazione del giunto tra parete e solaio in presenza del massetto di galleggiante (a destra)

# 4. IL CONTROLLO DEL RUMORE DEGLI IMPIANTI

---

## CONTENUTI

---



---

**LUCA BARBARESÌ**

<http://orcid.org/0000-0002-9515-7128>

**ANTONINO DI BELLA**

<http://orcid.org/0000-0002-0842-1198>

**GIOVANNI SEMPRINI**

<https://orcid.org/0000-0002-5388-8029>

---

Il controllo del rumore degli impianti tecnici fa parte delle fasi preliminari del progetto dell'edificio scolastico in funzione della tipologia di impianto e della sua dislocazione nell'edificio.

Una scelta opportuna dei locali tecnici e della posizione degli impianti a servizio dell'edificio permette di controllare gli effetti delle immissioni di rumore in ambiente esterno.

La scelta delle caratteristiche tipologiche e distributive dell'edificio scolastico dovrebbe essere orientata alla completa separazione delle parti potenzialmente "rumorose" da quelle maggiormente sensibili, in modo da ridurre, a parità di prestazioni, la complessità ed il costo delle strutture ad elevato potere fonoisolante.

La corretta distribuzione degli ambienti all'interno dell'edificio rispetto ai locali tecnici permette la riduzione del numero di transiti ed intersezioni impiantistiche, oltre che ridurre la lunghezza delle linee di distribuzione. Una razionale dislocazione degli spazi, infatti, può ridurre il rischio di disturbo da rumore ponendo gli ambienti sensibili, come le aule scolastiche, lontane dalle zone dell'edificio destinate alle centrali impiantistiche e dalle colonne verticali di distribuzione.

Le caratteristiche fonoisolanti, ed eventualmente fonoassorbenti, delle partizioni dei locali tecnici devono essere valutate a partire dalle caratteristiche di emissione sonora delle macchine che vi saranno installate.

La maggior parte delle situazioni critiche di installazione di apparati aeraulici deriva dalle ridotte dimensioni dei locali tecnici, dalla localizzazione degli stessi all'interno dell'edificio e dalle caratteristiche degli elementi strutturali dell'edificio.

L'integrazione del progetto degli impianti con il progetto dell'edificio permette la scelta di soluzioni tecniche ottimizzate, riducendo drasticamente la necessità di interventi di correzione acustica "post operam". Al tipo di impianto, infatti, sono strettamente connesse le strategie di progettazione volte alla riduzione della rumorosità immessa dalle macchine e dalle reti di distribuzione.

Ai fini della previsione degli interventi di attenuazione si distinguono gli impianti di climatizzazione e ventilazione, per i quali si considera sia la trasmissione per via aerea che per via solida, dagli altri tipi di impianti, come ad esempio quelli idrosanitari e meccanici (ascensori), per i quali è prevalente la trasmissione per via solida.

Per il collaudo degli impianti che presentano i terminali all'interno dello stesso ambiente disturbato la norma di riferimento è la UNI 8199.

## 4.1 Gli impianti di climatizzazione e ventilazione

Tra le diverse tipologie di impianto, quelli di climatizzazione ad aria possono determinare i livelli di pressione sonora più elevati negli ambienti serviti.

### Ventilatori

Tra le sorgenti di rumore, i ventilatori per la movimentazione dell'aria (Unità Trattamento Aria, Roof Top, ecc.) rappresentano la sorgente più rilevante dal punto di vista delle potenze sonore prodotte e trasmesse attraverso la rete di condotti o direttamente nell'ambiente servito. In generale, per ridurre il livello di rumore generato dai ventilatori, sono da preferire limitate velocità di rotazione delle pale, grandi diametri delle pale o dei rotor e il posizionamento dei ventilatori lontano da irregolarità del condotto (curve, variazioni di sezione, ecc.).

### Canalizzazioni

Possono costituire sorgenti di rumore secondarie i tratti rettilinei dei condotti di distribuzione dell'aria attraversanti gli ambienti scolastici, le curve, le diramazioni, le strozzature, le serrande, ecc. Per tali sorgenti è opportuno limitare la velocità dell'aria lungo il condotto (inferiore a 3 - 5 m/s), prevedere curve raccordate ad ampio raggio, evitare strozzature troppo accentuate e brusche variazioni di sezione.

Qualora sia presente un eccessivo livello sonoro in ambiente è necessario prevedere dei silenziatori da applicare lungo i condotti, realizzati con setti di materiale fonoassorbente, nella maggior parte dei casi installati a valle dell'unità di trattamento dell'aria.

La trasmissione di rumore laterale attraverso i condotti si riduce incrementando le capacità fonoisolanti del condotto stesso, ad esempio applicando un rivestimento esterno e una fasciatura con una certa massa. Per ridurre le trasmissioni per via solida si devono adottare supporti antivibranti, connessioni elastiche e interposizione di materiali resilienti. In ogni caso è opportuno che le reti di canali di distribuzione dell'aria siano ospitate nell'intercapedine di controsoffitti continui e che in questa sia presente uno strato di materiale fonoassorbente.

Una criticità nel controllo del rumore degli impianti è rappresentata dalla possibilità che i vari condotti dell'aria, in comune a più ambienti, possano favorire la trasmissione di rumore, creando così dei ponti acustici. Questo tipo di trasmissione è chiamata "cross talk" ed interessa anche ambienti non adiacenti. Al fine di evitare questi inconvenienti, è necessario studiare attentamente il percorso dei condotti in sede di progetto in modo che essi non attraversino in serie gli ambienti (Figura 4.1). Gli inconvenienti descritti in precedenza possono essere evitati prolungando il percorso dei canali che entrano ed escono dagli ambienti e posizionando i raccordi e gli snodi dei condotti in ambienti meno sensibili, ad esempio negli spazi di circolazione.

Alcune vie di trasmissione laterale devono essere accuratamente evitate, in quanto di difficile correzione in corso d'opera; in particolare è necessario prestare particolare



attenzione a:

- controsoffitti comunicanti;
- sigillatura perimetrale di partizioni e controsoffitti;
- griglie di ripresa;
- terminali comunicanti fra più ambienti;
- attraversamento di canali d'aria.

Al fine di ridurre la trasmissione “indiretta” del rumore per via aerea attraverso altri percorsi di trasmissione:

- le partizioni fra ambienti sensibili devono continuare oltre il controsoffitto fino al solaio strutturale al fine di prevenire il passaggio del rumore attraverso il plenum del controsoffitto;
- le aperture nelle partizioni dovute al passaggio di impianti elettrici o altro devono essere ben sigillate e opportunamente sfalsate;
- le canalizzazioni che passano attraverso ambienti sensibili al rumore devono essere accuratamente rivestite da strati fonoisolanti per evitare il cross-talk.

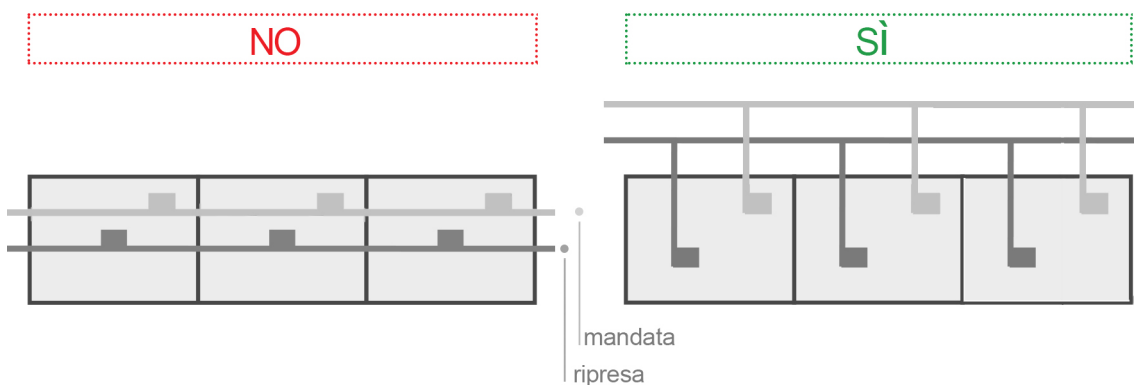


Figura 4.1 Schemi di percorso di condotti di aerazione a confronto

## Diffusori dell'aria e terminali di climatizzazione

Particolarmente critici sono i terminali, cioè le bocchette e i diffusori, in quanto irradiano direttamente il rumore in ambiente a causa dei fenomeni di turbolenza. Occorre dimensionare tali terminali in funzione della portata d'aria in modo da limitare la velocità in uscita e la conseguente potenza sonora emessa.

Se in ambiente sono presenti delle unità locali, come i ventilconvettori, la sorgente principale del rumore è il ventilatore. Per minimizzare il disturbo da rumore, è necessario dimensionare i ventilconvettori in modo che la massima resa termica (in raffreddamento e riscaldamento) corrisponda ad una bassa velocità dei ventilatori. In particolari situazioni è possibile applicare dei silenziatori (anche se di modesta efficacia) sulle sezioni di aspirazione e mandata dell'aria, nonché utilizzare supporti antivibranti per ridurre le trasmissioni per via solida.

## Ricambio dell'aria

È necessario prevedere, in accordo alla legislazione vigente, un numero minimo di ricambi d'aria, espressi in volumi/ora, da assicurare in scuole di diverso grado e ambienti a diversa destinazione d'uso. La scelta del tipo di ventilazione, naturale o meccanica, può essere guidata anche da ragioni di tipo acustico. Se il livello di rumore esterno nel periodo diurno risulta eccessivo, la semplice ventilazione naturale (apertura delle finestre) può non essere una scelta opportuna, vanificando ogni sforzo per un adeguato isolamento nel momento in cui gli utenti devono aprire le finestre per il rinnovo dell'aria. In ogni caso, prima di prevedere la ventilazione meccanica, è sempre meglio valutare le opportunità offerte dalla ventilazione naturale, eventualmente con l'adozione di dispositivi di attenuazione acustica. Al fine di soddisfare i limiti di rumore interno è necessario adottare bocchette di ventilazione con elevate capacità di attenuazione, in modo da non compromettere le prestazioni dell'intera facciata.

In molti casi la ventilazione in entrata e in uscita può essere ottenuta grazie ad un sistema di condotti che possono costituire dispositivi di attenuazione sonora. I camini di ventilazione, che realizzano il tratto terminale del sistema, hanno la possibilità di schermare o allontanare l'ingresso dell'aria dalla sorgente di rumore grazie all'orientamento e all'elevazione del camino. Per i camini di ventilazione è previsto il trattamento fonoassorbente all'interno del condotto e la presenza di lamelle acustiche per l'ingresso e l'uscita dell'aria.

## Caldaie e bruciatori

Tra i componenti dell'impianto di climatizzazione la centrale termica, se correttamente progettata, comporta rischi di rumore limitati. Le principali sorgenti sono il bruciatore, la caldaia e la canna fumaria. Gli interventi di insonorizzazione riguardano essenzialmente il bruciatore, per il quale è prevista l'insonorizzazione tramite l'applicazione di una "cuffia" afonica. Per ridurre gli effetti di eventuali risonanze nelle canne fumarie di caldaie di grande taglia è consigliabile l'adozione di silenziatori.

## Gruppi frigoriferi e pompe di calore

Per quanto riguarda i gruppi refrigeranti, questi si possono dividere in due tipologie: quelli raffreddati ad acqua, installati in locali chiusi, a cui sono spesso accoppiate torri di raffreddamento per la dissipazione del calore in atmosfera, e quelli raffreddati ad aria, che si trovano spesso sulla copertura dell'edificio. Per entrambi la sorgente principale di rumore è il compressore, alla quale si aggiunge il ventilatore per i gruppi frigo raffreddati ad aria. In questi casi è opportuno, oltre a scegliere macchine silenziose, adottare supporti antivibranti e garantire un adeguato fonoisolamento, senza determinare elevate perdite di carico per i gruppi raffreddati ad aria. Per le torri di raffreddamento la sorgente di rumore principale è il ventilatore e valgono gli accorgimenti dei gruppi refrigeranti raffreddati ad aria. Discorso analogo per le pompe di calore.

In ogni caso, per tutte le macchine e gli apparecchi rotanti/vibranti, la corretta progettazione del supporto strutturale rappresenta il metodo più efficace per il contenimento delle vibrazioni e della rumorosità prodotta. L'efficacia delle tecniche di installazione degli apparati vibranti risiede, oltre che nella corretta progettazione del supporto strutturale, anche nel contenimento delle vibrazioni secondarie determinate dall'elevato livello di pressione sonora presente all'interno dei locali tecnici e dalla connessione rigida di tubazioni e condutture.

Se è prevista la disposizione di griglie all'esterno dell'edificio per la ripresa e l'espulsione dell'aria o di sorgenti sonore che emettono nell'ambiente esterno, queste costituiscono sorgenti sonore fisse la cui rumorosità deve essere controllata. La collocazione degli impianti all'esterno degli edifici deve tenere conto della direttività delle sorgenti sonore, oltre che dei fenomeni di riflessione e diffrazione delle onde sonore.

## Reti idroniche

Il rumore che si origina dalla rete idraulica, che consiste nel sistema di tubazioni che porta l'acqua calda e/o refrigerata ai terminali d'impianto, nella quale sono compresi anche i radiatori e i pannelli radianti, è quasi sempre generato da pompe che inducono la circolazione forzata. Il disturbo acustico aereo è quasi sempre limitato, mentre per limitare quello strutturale è opportuno adottare connettori flessibili e supporti antivibranti. Per le tubazioni, che possono considerarsi sorgenti secondarie, occorre ridurre la velocità dell'acqua, adottare supporti elastici e rivestimenti resilienti. Il corretto dimensionamento delle valvole ridurrà rumori di cavitazione, vibrazioni e fischi.

## 4.2 Gli impianti idrosanitari

**G**li impianti idrosanitari possono costituire sorgenti di rumore rilevanti. Il rumore emesso dalle tubazioni è prodotto sia dalle vibrazioni trasmesse direttamente alle pareti, attraverso i condotti, sia dalle turbolenze del fluido che in esse scorre.

Una progettazione della disposizione dei locali acusticamente ottimale dal punto di vista della riduzione del rumore indotto dagli impianti idrosanitari si realizza nel modo più efficace e più vantaggioso rispettando le seguenti raccomandazioni:

- disposizione concentrata dei locali sanitari;
- sovrapposizione dei locali sanitari a piani diversi;
- disposizione centrale dei vani tecnici nell'area dei locali sanitari;
- i locali sensibili al rumore devono essere separati dai locali sanitari mediante pareti divisorie prive di installazioni e con un sufficiente potere fonoisolante (massa areica > 200 kg/m<sup>2</sup>).

Nella realizzazione degli impianti idrosanitari devono essere adottate tutte le cautele suggerite dalla regola dell'arte con riferimento al dimensionamento e posa delle tubazioni di adduzione dell'acqua calda e fredda, della rete di scarico, dei miscelatori, ecc., al fine di limitare la generazione di rumore dovuta a fenomeni di turbolenza nelle curve, di cavitazione nelle sezioni ristrette, di colpo d'ariete nei transitori, e la propagazione

per via solida attraverso le strutture. Per limitare la rumorosità di questi impianti valgono le indicazioni riportate sul controllo del rumore della rete idraulica dell'impianto di climatizzazione. Per limitare i rumori trasmessi per via aerea e strutturale dagli impianti idrosanitari è opportuno:

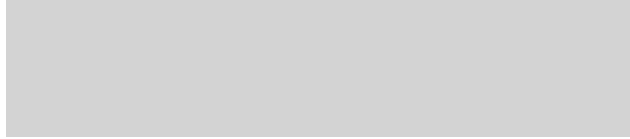
- adottare tubi di massa adeguata;
- inserire le tubazioni in cavedi impiantistici;
- utilizzare collari di supporto delle tubazioni di tipo silenziato (dotati di materiale elastico nella superficie interna);
- inserire materiale elastico tra tubazioni e attraversamenti murari.

## 4.3 Gli ascensori

Tra le due tipologie di ascensori esistenti sul mercato, oleodinamici e a fune, i primi determinano una minore emissione sonora, dovuta essenzialmente alla presenza di una centralina idraulica il cui motore/compressore opera solo in fase di salita, al contrario di quanto accade nei secondi in cui l'organo elettrico opera in tutte le fasi di funzionamento. In ogni caso, le componenti motrici degli ascensori devono essere poste in un apposito locale isolato acusticamente sia nei confronti della trasmissione per via aerea che per via solida.

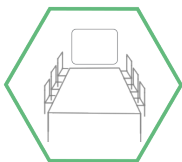
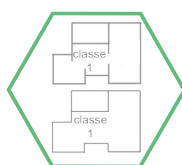
Come già evidenziato, gli ascensori del tipo a fune sono maggiormente rumorosi. All'interno del locale macchine sono attesi livelli di rumore mediamente elevati; tale criticità può essere ridotta prevedendo la realizzazione di pareti con adeguato potere fonoisolante e l'uso di porte ad elevato isolamento acustico. Al fine di evitare la generazione di fenomeni vibroacustici si devono prevedere basamenti inerziali e idonei supporti antivibranti. Per gli ascensori privi di locale macchina sono sufficienti argani più piccoli e compatti che però possono dare origine a livelli di rumore piuttosto elevati. In tali tipi di ascensori potrebbe essere particolarmente critico il problema della trasmissione delle vibrazioni alle strutture. A questo proposito sarà quindi importante prevedere elementi resilienti in corrispondenza del fissaggio delle vie di corsa.

Infine dovrà essere prestata attenzione anche ai dispositivi di apertura e di chiusura delle porte al piano.



# 5. FAVORIRE LA COMPRENSIONE DEL PARLATO

## CONTENUTI



ROBERTO FURLAN

<http://orcid.org/0000-0002-0377-0444>

LUIGI MAFFEI

<https://orcid.org/0000-0003-4130-5065>

RICHARD OBERKALMSTEINER

NICOLA PRODI

<https://orcid.org/0000-0002-2654-6445>

ANDREA TOMBOLATO

La comprensione della parola negli ambienti scolastici deve avvenire in condizioni di minimo affaticamento. Come descritto nei capitoli precedenti, la limitazione del rumore interno ed esterno è il presupposto necessario per avere, in condizioni d'uso, un segnale vocale che sia più energetico del rumore e che quindi non sia da esso mascherato. A fianco però di questa condizione di bassa rumorosità è indispensabile il controllo delle caratteristiche acustiche proprie dell'ambiente ed in particolare della riverberazione del suono o coda sonora. Questo attributo percettivo, dovuto essenzialmente ai volumi in gioco ed alle finiture interne, condiziona la buona trasmissione del messaggio vocale. Infatti, quando il segnale vocale viene trasmesso in una sala con eccesso di riverberazione, i fonemi, di cui le sillabe sono composte, acquistano una propria coda riverberante che interferisce sulla ricezione dei fonemi seguenti, causando il loro mascheramento. Perciò in queste condizioni, anche in assenza di specifici rumori interni o esterni, la comprensione della parola è scarsa e pregiudica l'efficace fruizione dello spazio scolastico. Per ciascun volume dell'aula è quindi definito un requisito opportuno per la coda sonora, che si esprime con il tempo di riverberazione, e che tendenzialmente è più contenuto per l'uso esclusivamente didattico tradizionale crescendo poi nel caso di utilizzo musicale. I valori idonei sono riportati nell'Appendice C della norma UNI 11367. Nel riferimento si prevedono, per le aule non occupate e di volumetria più comune, ovvero  $V < 250 \text{ m}^3$ , tempi di riverberazione molto contenuti compresi nell'intervallo 0,5 - 0,8 s. Per le aule più grandi, invece, si arriva fino a circa 1,1 s, che è ammissibile per volumi maggiori, ovvero  $V = 2000 \text{ m}^3$ . A parità di volume i valori garantiti per le aule dei primi gradi di istruzione devono essere cautelativamente più bassi data la maggiore vulnerabilità degli occupanti.

La riverberazione interna all'ambiente è cruciale anche per il controllo del rumore generato dagli occupanti. Questa componente del campo acustico è in realtà spesso quella che arreca il maggior disturbo nelle aule e risente in maniera diretta di quanto sia corretto o meno il tempo di riverberazione progettato per l'aula. È noto infatti che, a causa dell'*Effetto Lombard*<sup>2</sup>, le condizioni diventano critiche sia per l'insegnante, che per vincere il rumore deve elevare lo sforzo vocale, che per gli studenti, poiché ancora una volta il brusio amplificato dalla riverberazione maschera ciò che l'insegnante sta dicendo, specie nelle posizioni d'ascolto

---

<sup>2</sup> L'*Effetto Lombard*, descritto già nel 1910 dal medico francese Etienne Lombard, consiste nel legame tra il livello di emissione vocale del parlatore ed il livello di rumore presente nell'ambiente in cui esso si trova. Con l'aumento del livello di rumore ambientale il parlatore aumenta il livello di emissione e ciò determina, in presenza di molti parlatori, una rumorosità molto elevata nell'ambiente (per approfondimento: H. Lane and B. Tranel, *J. Speech Hear. Res.* 14, 677-709, 1971).

più lontane. Per garantire una trasmissione della parola efficace, la riverberazione deve essere quindi contenuta in termini assoluti ma anche molto ben equilibrata tra le diverse frequenze. Soprattutto non deve essere eccessiva nell'intervallo delle frequenze gravi per evitare che, a causa del mascheramento uditivo, questo squilibrio renda poco comprensibile la parte del segnale vocale che occupa le frequenze medie ed acute. Per la natura del segnale vocale questa è infatti la parte più utile a chi ascolta per non confondere tra loro le sillabe simili.

Oltre alla giusta riverberazione che evita il mascheramento, la buona ricezione del segnale parlato necessita di riflessioni efficaci del suono, che mettano in maggior risalto il suono diretto proveniente dalla bocca dall'insegnante, rendendolo più nitido e quindi più comprensibile. Questi contributi, chiamati prime riflessioni, possono arrivare dalle pareti laterali e dal soffitto e devono raggiungere tutte le posizioni d'ascolto subito dopo il suono diretto. La verifica di questi contributi avviene per via geometrica su pianta e sezione dell'aula, costruendo le riflessioni speculari del suono sulle diverse superfici (soffitto, pareti laterali, parete di fondo) e verificando che il ritardo temporale rispetto all'arrivo del suono diretto sia entro il limite convenzionale di 50 ms.

La mancanza di riflessioni di questo tipo o il loro ritardo eccessivo peggiora la trasmissione della parola ed aumenta lo sforzo vocale dell'insegnante. Inoltre, se una riflessione proviene da una superficie a distanza eccessiva può essere causa di eco, ossia di una copia esatta del messaggio vocale troppo ritardata nel tempo, e ciò è deleterio per la comprensione della parola.

Infine è necessario che le riflessioni successive a quelle iniziali siano distribuite per direzione di provenienza e non siano concentrate, come ad esempio succede nel caso si abbiano riflessioni ripetute solo tra coppie di superfici (ad es. tra pareti laterali o tra soffitto e pavimento). Per effetto degli echi ripetuti (*flutter echo*) il suono presenta una distorsione del timbro che lo rende innaturale e meno comprensibile.

L'apporto delle prime riflessioni e del riverbero alla ricezione del parlato viene qualificato tramite specifici indicatori acustici che possono essere oggetto di calcolo previsionale e di successiva misurazione. In particolare nell'Appendice C della norma UNI 11367 sono impiegati per gli ambienti scolastici due indicatori. Il primo è la "Chiarezza della parola (C50)", definita nella norma UNI EN ISO 3382 - Parte 1 per la quale si richiede di soddisfare negli ambienti dedicati alla parola  $C50 \geq 0$  dB. Il secondo indicatore è lo Speech Transmission Index (STI) o "indice di trasmissione del parlato" definito nella norma CEI EN 60268 - Parte 16, per il quale si richiede nell'aula  $STI \geq 0,60$ .



## 5.1 Le aule per la didattica

Nel seguito si forniscono indicazioni pratiche su forma dell'ambiente e posizionamento dei materiali per sviluppare un progetto acustico delle aule che eviti o risolva i problemi di natura geometrica e che includa, sia per quelle di dimensioni più contenute (tipicamente  $V < 250\text{m}^3$ ) che per quelle più grandi, tutte le componenti che concorrono alla buona ricezione del suono, ossia un suono diretto efficace, un suono riflesso a supporto del suono diretto ed infine una riverberazione adeguata.

### Volume e forma

Per la corretta progettazione acustica di un'aula scolastica è inizialmente necessaria una particolare attenzione al volume ed alla forma dello spazio, a partire dalla pianta. Per dimensionare correttamente il volume ai fini acustici si debbono considerare i riferimenti in Tabella 5.1 che specificano i  $\text{m}^3$  per persona a seconda del tipo di attività prevalente nell'aula (per es. un'aula per didattica tradizionale con 25 alunni avrà un volume compreso tra  $75\text{ m}^3$  e  $150\text{ m}^3$ ). Rimanere prossimi all'intervallo di riferimento, pur non costituendo di per sé garanzia di una buona acustica, può sicuramente favorire il successivo ottenimento di condizioni idonee. Viceversa allontanarsi dagli intervalli indicati può costituire una complicazione per le fasi successive della progettazione acustica.

Tabella 5.1 Dimensionamento del volume ai fini acustici

| Uso primario dell'ambiente | Indice di volume, K, in $\text{m}^3/\text{occupante}$ |
|----------------------------|---|
| Parlato                    | 3 a 6   |
| Parlato e musica           | 5 a 8   |
| Musica                     | 7 a 12  |

Una volta fissato il volume si considerano i rapporti dimensionali e la forma in pianta dell'aula. I rapporti dimensionali devono essere ben proporzionati evitando ambienti molto lunghi e stretti o eccessivamente bassi. Una pianta rettangolare è sicuramente da preferire mentre dovrebbero essere evitate piante circolari ed ellittiche per il rischio di concentrazioni del suono in alcune posizioni. Altre forme, come ad esempio piante trapezoidali, possono essere adottate con l'indicazione di collocare, se possibile, la posizione dell'oratore sul lato più largo con le pareti che convergono nella direzione verso cui avviene la presentazione. Pareti e soffitti concavi o voltati che abbiano finitura acusticamente riflettente sono da evitare perché determinano focalizzazioni sonore (Figura 5.1), così come pareti piane, parallele e riflettenti associate ad un soffitto fonoassorbente perché, come già detto, possono determinare echi ripetuti (*flutter echo*).

La presenza di soffitti voltati o ampie pareti piane e riflettenti è piuttosto comune per le scuole ospitate in edifici storici ristrutturati. In questi casi per evitare echi ripetuti e concentrazioni del suono si dovranno gestire in maniera puntuale le riflessioni da tali superfici come descritto nel paragrafo che segue.

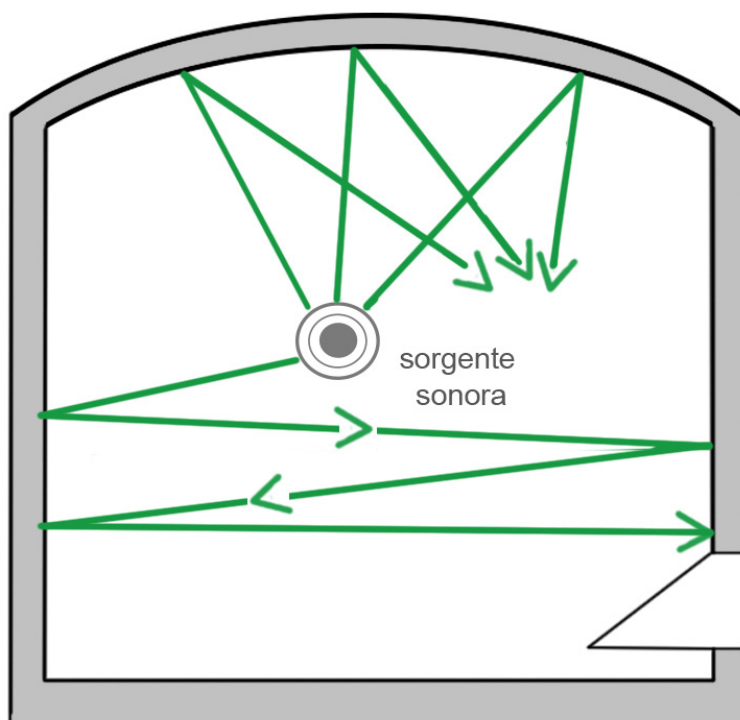


Figura 5.1 Ambiente con una parete concava che genera focalizzazioni sonore e con pareti piane e parallele che generano echi ripetuti

## Controllo degli echi ripetuti e singoli

Nelle aule di dimensioni più contenute e di forma regolare, la presenza degli echi ripetuti è meno critica poiché gli invcavi delle finestre, le librerie e scaffalature di adeguata altezza e la cattedra, i banchi e le sedie, che si trovano nell'ambiente arredato, provvedono ad una utile diffusione delle onde sonore incidenti. Perciò il rischio degli echi ripetuti diminuisce molto nell'aula arredata rispetto alla condizione di aula spoglia.

Qualora però si presenti il caso di estese pareti piane, parallele e riflettenti o di pareti con profilo concavo, per evitare echi ripetuti si deve prevedere un trattamento fonoassorbente o acusticamente fonodiffondente o un'inclinazione di almeno  $5^\circ$  delle pareti stesse rispetto alla verticale.

Soluzioni idonee al trattamento acustico possono essere ad esempio una contro-parete con finitura fonoassorbente che operi, se necessario, anche la rettifica della curvatura della parete concava. Per il trattamento fonodiffondente la soluzione più efficace consiste nel movimentare il profilo di almeno una delle pareti che a coppie generano echi ripetuti. Qualora questa soluzione non sia praticabile è possibile ottenere buoni risultati con l'aggiunta sulle pareti laterali di finiture o di strutture acusticamente diffondenti (Figura 5.2). Sulle superfici fonodiffondenti si veda anche quanto indicato nel capitolo 6.

Le finiture fonodiffondenti consistono in pannelli apposti dal profilo molto articolato che disperdono il suono incidente e si collocano a parete nelle zone più critiche, almeno su una delle pareti che generano l'eco ripetuta. Le strutture fonodiffondenti

possono avere la forma di scatole, calotte, semi-cilindri, ecc. con rilievo ed ingombro fino a qualche decina di centimetri nel caso che gli echi ripetuti si manifestino nell'intervallo delle frequenze gravi. Anche le strutture diffondenti devono essere posizionate su almeno una delle pareti interessate dal fenomeno degli echi ripetuti. Questi dispositivi diffondenti, specie nelle aule più grandi e sprovviste di una quantità di arredi utile al medesimo scopo, possono migliorare sensibilmente la qualità del suono percepito dagli studenti.

Nel caso in cui il soffitto sia voltato si può procedere o tramite un controsoffitto che rettifichi la volta e che potrà essere di caratteristiche miste assorbenti e riflettenti (si veda paragrafo *Riverberazione*) oppure con elementi fonoassorbenti sospesi, che permettano la lettura architettonica del volume originario eliminando il difetto acustico dato dalla geometria della volta. Questa soluzione sarà dimensionata per provvedere l'assorbimento acustico necessario alla riverberazione richiesta (Figura 5.2).

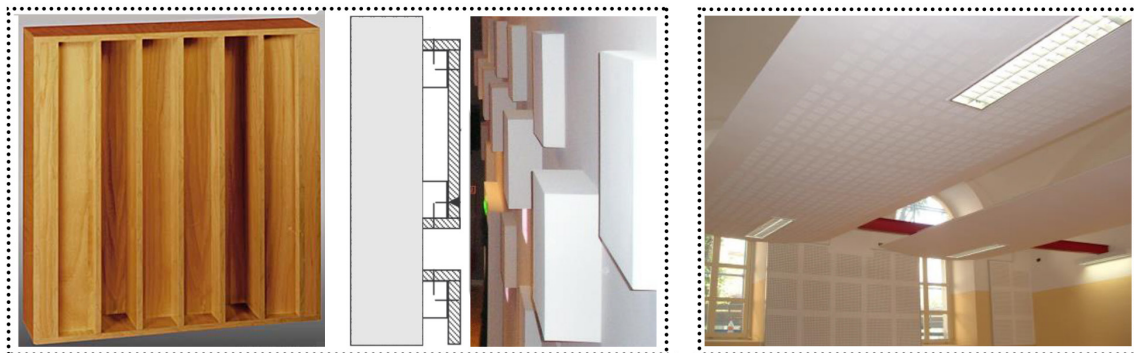


Figura 5.2 Trattamenti diffondenti: a sinistra un pannello fonodiffondente commerciale; al centro una struttura a scatola in lastre di gesso che diffonde il suono, vista in sezione e una volta collocata a parete; a destra un trattamento fonoassorbente tramite pannelli sospesi che eliminano il rischio di concentrazioni sonore dal soffitto voltato

Oltre al rischio degli echi ripetuti, in ambienti lunghi più di 9 m con parete di fondo riflettente si determina un eco singolo disturbante per gli ascoltatori delle prime file. Per evitare l'eco, la parete di fondo deve essere oggetto di trattamento fonoassorbente oppure deve essere inclinata verso l'uditorio in modo da riflettere il suono incidente prevalentemente sulle ultime file, determinando, per queste ultime, una vantaggiosa amplificazione sonora (Figura 5.3).

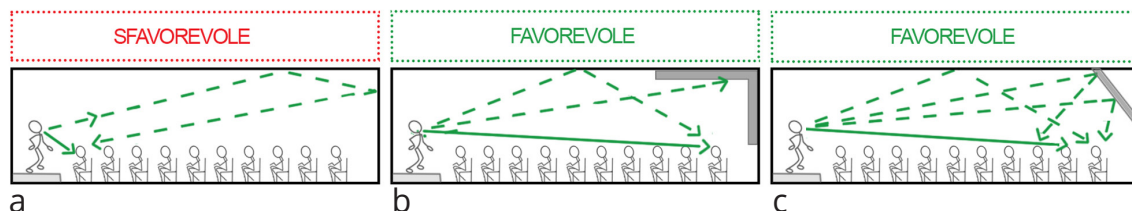


Figura 5.3 La parete di fondo riflettente può causare eco disturbante per l'oratore e gli ascoltatori delle prime file se l'ambiente è lungo più di 9 m (a). Per evitare l'eco la parete di fondo deve essere oggetto di trattamento acustico fonoassorbente (b) o essere riflettente e inclinata verso l'uditorio in modo da riflettere il suono incidente sulle ultime file (c), determinando per gli ascoltatori più distanti dalla sorgente una vantaggiosa amplificazione sonora. Immagine adattata da DIN 18041

## Suono diretto

Negli ambienti di dimensioni più contenute vi è generalmente una buona visibilità dell'insegnante da tutte le posizioni d'ascolto e ciò garantisce una buona trasmissione diretta della voce.

Viceversa, negli ambienti più grandi e quindi più lunghi, per favorire la propagazione del suono diretto della voce dell'insegnante verso il fondo dell'ambiente, è consigliabile prevedere una pedana in corrispondenza della cattedra al fine di elevare la sorgente sonora e renderla ben visibile dagli studenti. Infatti la visione non schermata dell'insegnante (bocca in movimento, mimica e gestualità), migliora le condizioni di ascolto e questa strategia è particolarmente indicata per le persone con limitate capacità uditive o non madrelingua. Con il crescere delle distanze può essere molto utile inclinare il piano dell'uditorio al fine di garantire la migliore trasmissione diretta (Figura 5.4).

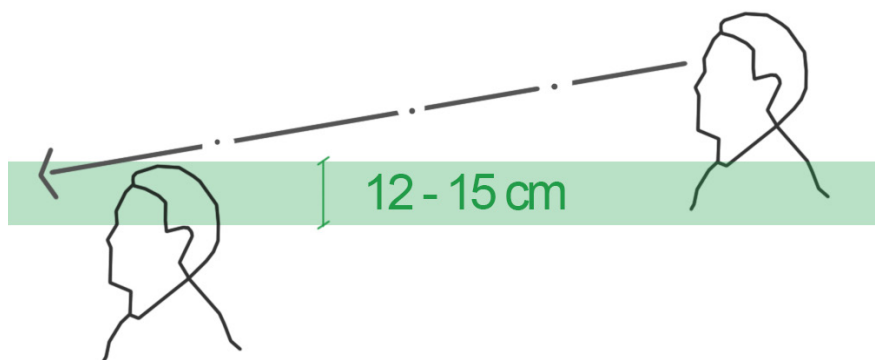


Figura 5.4 Regola di base per garantire la visibilità dell'oratore e una buona trasmissione del suono diretto tra le diverse file occupate dagli studenti negli ambienti più grandi

## Prime riflessioni

Negli ambienti di dimensioni più contenute le distanze in gioco sono piuttosto brevi e sono sempre potenzialmente disponibili delle prime riflessioni efficaci sia dal soffitto che dalle parti laterali. Ciò comporta che il livello sonoro dell'oratore, con pochi accorgimenti aggiuntivi (si veda paragrafo *Riverberazione*), sia adeguato anche nelle posizioni verso il fondo dell'aula e non sia necessario prevedere superfici di riflessione aggiuntive a supporto della propagazione del suono.

Viceversa negli ambienti più grandi si rende spesso necessario utilizzare l'apporto delle prime riflessioni per incrementare il livello sonoro nelle posizioni più lontane. Come criterio di riferimento è bene considerare che i contributi più intensi verso il fondo dell'ambiente sono prodotti da superfici riflettenti in prossimità della sorgente. In particolare nel caso di sale conferenze o auditoria possono essere aggiunti a soffitto o sulle superfici laterali grandi pannelli con finitura riflettente, che devono essere disposti ed inclinati in modo da dirigere il suono verso l'area centrale e posteriore della sala (Figura 5.5). Per il parlato queste superfici dovrebbero assorbire le basse frequenze e

riflettere le medie e le alte frequenze (agendo come pannelli vibranti). Le dimensioni tipiche di questi pannelli sono non inferiori a  $1,5 - 2 \text{ m}^2$  mentre la loro massa superficiale varia a seconda del materiale impiegato, avendo come riferimento il valore di  $5 \text{ kg/m}^2$ .

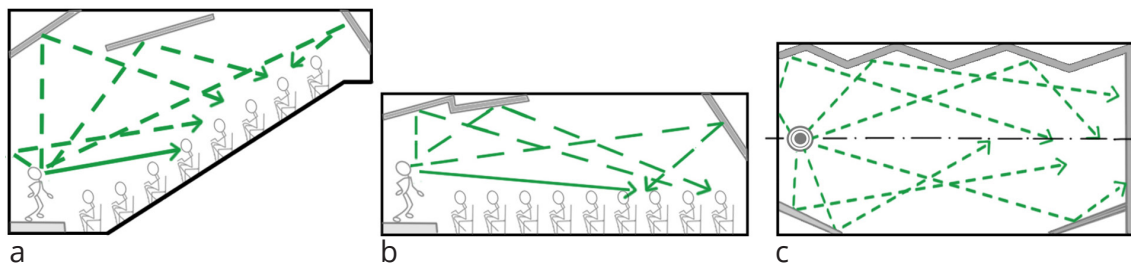


Figura 5.5 Posizionare riflettori a soffitto e a parete in modo da direzionare il suono riflesso verso l'area centrale e posteriore dell'ambiente. (a e b: riflettori in sezioni verticali; c: riflettori in pianta). Immagine adattata da DIN 18041

## Riverberazione

La correzione acustica avviene tramite un'appropriata applicazione di materiali fonoassorbenti ed acusticamente riflettenti, con l'obiettivo di ottenere un tempo di riverberazione ottimale e una buona intelligibilità per tutti gli occupanti.

Come detto in precedenza, nell'Appendice C della norma UNI 11367 sono individuati i valori di tempo di riverberazione in ragione del volume dell'ambiente.

Fissato quindi il volume si procede a dimensionare il trattamento acustico necessario al raggiungimento dei valori richiesti. Per l'effettiva rispondenza ai requisiti è necessario, per prima cosa, che il materiale fonoassorbente non sia concentrato su un'unica superficie.

In particolare nelle aule scolastiche è preferibile una distribuzione omogenea dei materiali fonoassorbenti sulle superfici del locale, considerando che essi devono essere applicati ad un'adeguata altezza da terra. Ciò è necessario per evitare danneggiamenti in quanto le superfici dei materiali di trattamento fonoassorbente (quali ad esempio pannellature di materiali porosi o fibrosi) si presentano spesso più cedevoli al tatto e più fragili all'urto rispetto alle pareti strutturali o presentano fori e fessure che li rendono più vulnerabili rispetto ai danneggiamenti.

In ordine di priorità le prime superfici da trattare sono la parete di fondo e la parte posteriore del soffitto, per poi intervenire sulla parte alta delle superfici laterali, sempre a partire dal fondo dell'aula. Di norma non è consigliabile posizionare i materiali fonoassorbenti nei pressi della sorgente sonora poiché si riduce considerevolmente il livello sonoro nelle posizioni d'ascolto. È buona prassi mantenere una zona centrale del soffitto acusticamente riflettente per aggiungere, come discusso nel paragrafo *Prime riflessioni*, una prima riflessione efficace al suono dell'oratore. Così facendo parte dell'assorbimento acustico troverà spazio nella zona superiore delle pareti laterali. Seguendo questi criteri risultano particolarmente indicate le configurazioni (b) e (c) rappresentate in Figura 5.6.

Negli ambienti di piccole dimensioni, possono inoltre presentarsi fenomeni di riso-

nanza alle basse frequenze, che possono risultare particolarmente fastidiosi soprattutto nel caso di aule destinate alla formazione musicale. Vi si può rimediare con interventi di fonoassorbimento alle specifiche frequenze di risonanza dell'ambiente o con la scelta di adeguate proporzioni geometriche degli spazi. Elementi fonoassorbenti per il suono a bassa frequenza sono particolarmente efficaci se situati negli angoli o negli spigoli della stanza.

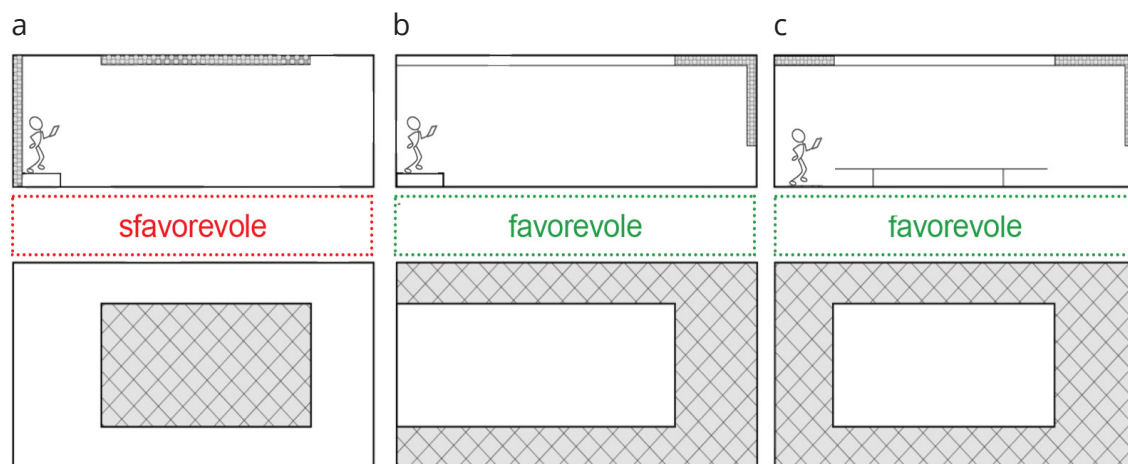


Figura 5.6 Distribuzione delle superfici fonoassorbenti in ambienti scolastici di piccole e medie dimensioni (sopra: sezioni verticali, sotto: viste dal basso della superficie del soffitto). Immagine adattata da DIN 18041

Quando l'aula didattica ha dimensioni più grandi il posizionamento di materiali fonoassorbenti sul contorno deve procedere solo dopo una verifica preliminare sull'integrità delle prime riflessioni. In particolare le finiture fonoassorbenti devono interessare solo le zone di pareti laterali o del soffitto che non siano utili per le riflessioni iniziali verso l'uditorio. Le porzioni utili alle prime riflessioni possono essere ricavate per via geometrica lavorando su piante e sezioni e tracciando i cammini delle riflessioni speculari che, da ciascuna superficie, raggiungono gli ascoltatori nelle diverse posizioni. Come descritto dalla Figura 5.7, per il soffitto le prime riflessioni sono generate da una parte non trascurabile dell'area, che quindi non deve essere trattata acusticamente.

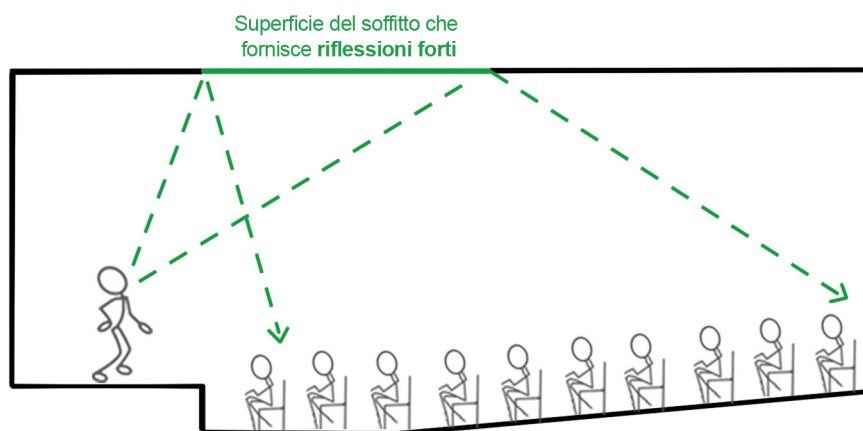


Figura 5.7 Individuazione della parte del soffitto che fornisce riflessioni utili e pertanto non deve essere trattata acusticamente. Una procedura analoga si svolge per le altre superfici



Seguendo questo semplice criterio geometrico per il soffitto e per le pareti laterali solitamente le porzioni che rimangono utili al trattamento acustico sono ricavate nelle zone laterali e posteriore del soffitto e nella parte superiore delle pareti laterali. La strategia più efficace è quella di distribuire la superficie fonoassorbente complessiva tra le diverse superfici, ad esempio tra le zone perimetrali del soffitto ed una parte sommitale delle pareti laterali. Con questa disposizione si avrà il maggior rendimento fonoassorbente del materiale e quindi si otterrà anche una progettazione acustica più affidabile ed economica.

## Supporto dell'amplificazione elettroacustica

Un sistema elettroacustico di amplificazione sonora non può essere considerato il mezzo per compensare un'inadeguata progettazione acustica dell'ambiente. I sistemi di amplificazione non sono generalmente necessari in ambienti fino a 250 m<sup>3</sup>, in ambienti fino a 500 m<sup>3</sup> con livello di rumore di fondo non superiore a 40 dB(A), in ambienti fino a 1000 m<sup>3</sup> con livello di rumore di fondo non superiore a 35 dB(A) e in ambienti fino a 2000 m<sup>3</sup> con livello di rumore di fondo non superiore a 30 dB(A). Ulteriori indicazioni sull'uso di sistemi elettroacustici sono riportate nella norma tedesca DIN 18041 e nel paragrafo 5.5.

## 5.2 Spazi didattici a pianta aperta e semi-aperta

Questi ambienti hanno riguadagnato interesse in anni recenti, specie per le notevoli potenzialità pedagogiche e di versatilità che offrono rispetto alle tradizionali aule chiuse. Purtroppo i problemi acustici degli spazi a pianta aperta e semi-aperta sono più critici e complessi rispetto alle aule chiuse. Per questo la progettazione deve coinvolgere attivamente fin dalle prime fasi anche l'organizzazione della didattica a cui lo spazio deve essere funzionale, e deve considerare con grande attenzione la sistemazione dei gruppi classe ed i flussi di studenti ed insegnanti all'interno dell'edificio.

La suddivisione di questi spazi in tipologie aperte o semi-aperte dipende dalla totale o parziale condivisione dello stesso volume da parte di diversi gruppi classe (Figura 5.8). Nel *layout aperto* vi è un medesimo volume con minime separazioni tra i gruppi, e quindi c'è un serio rischio di disturbo dovuto al rumore specie quando le attività sono tra loro differenti (attività silenziose per un gruppo e rumorose per gli altri).

È da notare inoltre che la variabilità del rumore stesso, l'assenza di un possibile controllo diretto su di esso e soprattutto il contenuto semantico (spiegazioni, discussioni, audiovisivi ecc.) sono fattori particolarmente critici per gli altri gruppi e causano, oltre al disturbo, una notevole distrazione per chi non è interessato direttamente all'attività ma la subisce.

Perciò sono necessarie nello spazio didattico aperto delle strutture separate di idonee caratteristiche acustiche entro le quali raccogliere piccoli gruppi per garantire ad essi un rumore di fondo che non pregiudichi condizioni di comunicazione efficaci. Diversamente è improbabile garantire la privacy necessaria e viene del tutto compromes-

sa la versatilità nell'uso.

Nello *spazio semi-aperto* si trovano divisori fissi o mobili tra i gruppi classe, che condividono una zona aperta (Figura 5.9).

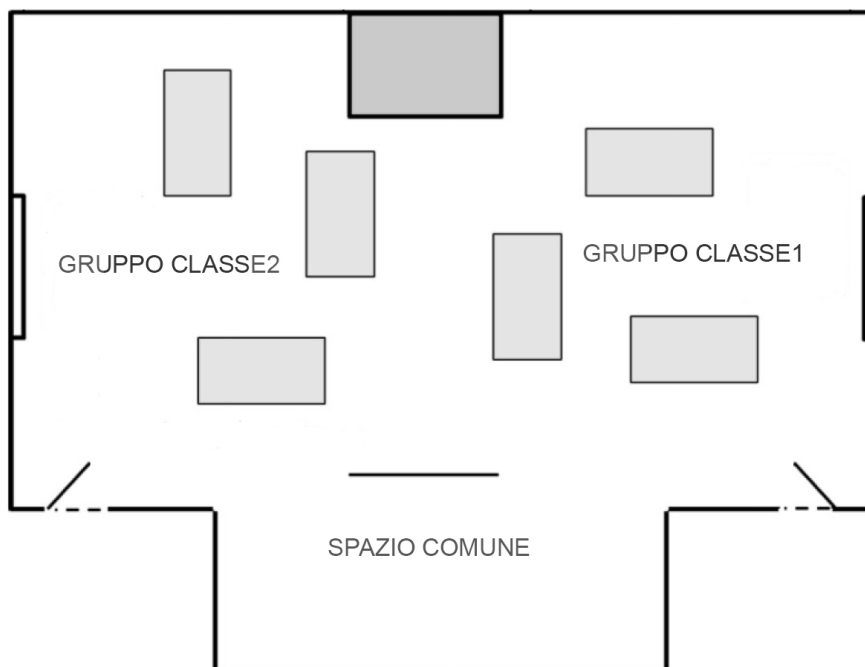


Figura 5.8 Un possibile layout con due gruppi classe nello spazio aperto, che ha solo alcuni arredi schermanti di scarsa efficacia acustica. Adattato da Mealings et al. J. Acoust. Soc. Am. 138(4)

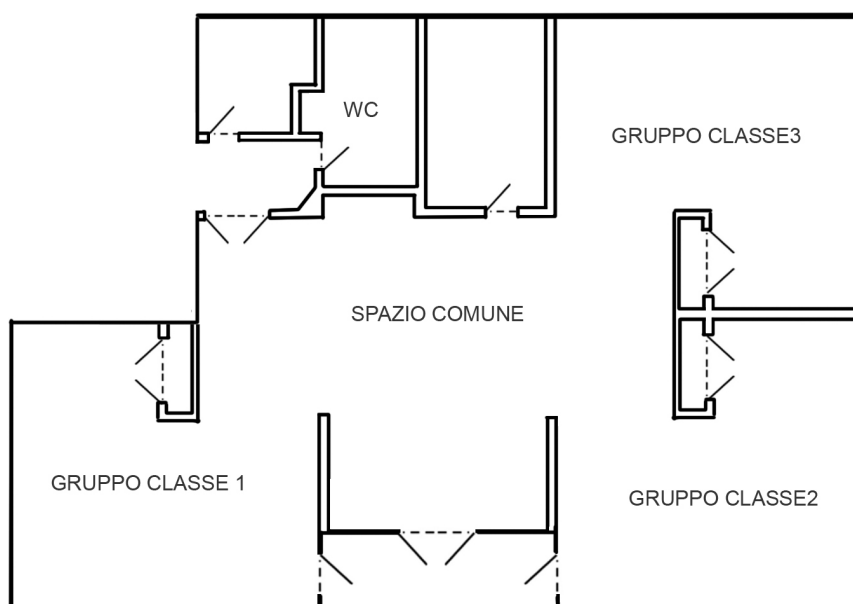


Figura 5.9 Un possibile layout semi-aperto con tre gruppi classe che sono separati da divisori fissi ma con chiusura non completa, e che condividono uno spazio centrale. Adattato da Greenland et al. J. Acoust. Soc. Am. 130(3)



Anche in questo caso il problema della privacy è cruciale e solitamente si indica in 20 dB l'attenuazione richiesta tra le zone dei diversi gruppi per avere condizioni accettabili. Gli affacci su atri o su grandi volumi sono da evitare ed i percorsi di transito sono molto critici poiché possono generare una forte rumorosità immessa. Le strategie di organizzazione dello spazio diventano cruciali, quali ad esempio un limite massimo di tre gruppi classe nel medesimo spazio semi-aperto, preferibilmente disposti linearmente. Quando sia possibile, è auspicabile ricorrere a partizioni mobili a tenuta acustica, anche trasparenti, che separano fisicamente i volumi risolvendo le problematiche di isolamento tra i gruppi, specie quando sono impegnati in attività molto differenti dal punto di vista della rumorosità. Tali soluzioni implicano però un certo grado di complessità gestionale e pertanto sono utilizzate al meglio solo se vengono fatte proprie da docenti e studenti come risorsa per garantire la flessibilità didattica dello spazio.

In generale il controllo dell'acustica negli spazi aperti e semi-aperti deve sempre comprendere una strategia passiva affidata alla progettazione dell'involucro, delle superfici e degli arredi, ed una attiva, parimenti importante, legata alla programmazione delle attività tra i gruppi per evitare possibili conflitti ed eccessive commistioni di gruppi con età tra loro troppo diverse. Si deve poi curare che sia piuttosto bassa la densità di occupazione (tipicamente si richiedono più di 4 m<sup>2</sup> per studente), che la mobilità tra le diverse zone non ostacoli la fruizione e che vi siano da parte di docenti e studenti pratiche di gestione del rumore del gruppo classe il più possibile efficaci.

Dal punto di vista tecnico il progetto acustico passivo ha lo scopo di ostacolare la propagazione del rumore tra le diverse aree dello spazio aperto, ossia tra i diversi gruppi classe, ed evitare così il disturbo, la distrazione ed infine l'innescarsi dell'*Effetto Lombard* (si veda nota a piè di pagina 38). Le specifiche acustiche per questi ambienti in termini di riverberazione sonora sono richiamate nella norma UNI 11532 (attualmente in revisione) che riprende la normativa Nord-Europea. I valori ammessi del tempo di riverberazione sono molto stringenti, e tipicamente compresi tra 0,4 s e 0,6 s alle frequenze medie. Per raggiungere un risultato simile si richiede che una superficie pari a 1,3 volte il pavimento sia trattata acusticamente con materiali che assorbano almeno il 75% dell'energia sonora alle frequenze medie. La superficie su cui concentrare il trattamento è il soffitto ed è consigliabile aggiungere fonoassorbimento sulle pareti, specie quelle che sono potenziali superfici di riflessione tra un gruppo e l'altro. Inoltre l'ambiente non deve essere troppo alto: il limite superiore di riferimento è 3,5 m. Per migliorare l'attenuazione tra i gruppi classe è possibile utilizzare schermi o arredi, anche mobili e riconfigurabili, la cui altezza deve essere tale da intercettare il suono diretto, quindi pari ad almeno 1,7 – 2,0 m. Schermi più alti e presumibilmente fissi possono arrivare a 0,5 m dal soffitto migliorando sensibilmente le prestazioni. La superficie degli schermi può essere essa stessa fonoassorbente ed inoltre il posizionamento delle schermature deve tenere conto di semplici regole geometriche cosicché, ad esempio, non risulta efficace laddove il suono possa riflettersi inferiormente o lateralmente (si veda Figure 5.10 e 5.11).

Ai fini del contenimento del rumore è bene prevedere un pavimento resiliente laddo-

ve non sia possibile adottare un pavimento fonoassorbente. Insieme ad accorgimenti semplici quali terminazioni in gomma per tavoli e sedie, questa soluzione contribuisce a limitare i rumori impattivi dovuti al transito ed alla risistemazione degli arredi che cambiano posizione nello spazio per le diverse attività che il gruppo classe affronta durante la giornata. Nella pratica, la disponibilità di molteplici spazi con caratteristiche acustiche differenti e fra loro vicini è preferibile ad un solo grande spazio con partizioni mobili interne, nel quale si rischia che le attività si disturbino se non pianificate con grande cura. Da questo punto di vista l'adozione della soluzione di spazio didattico aperto e semi-aperto deve essere presa con grande consapevolezza e preparazione alla gestione speciale che tali ambienti richiedono per poter funzionare in maniera appropriata e fornire, quindi, i vantaggi netti in termini pedagogici per i quali sono stati concepiti.

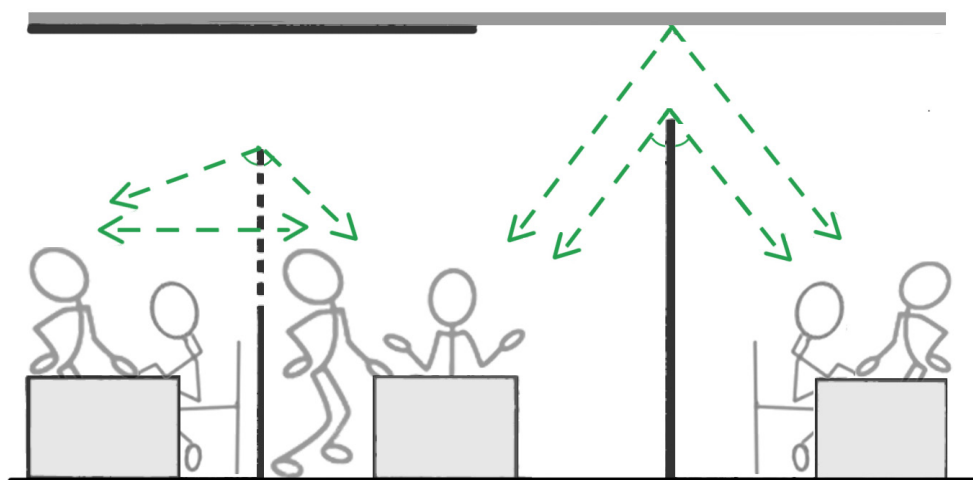


Figura 5.10 L'altezza degli schermi aumenta l'efficacia ai fini acustici. Per lavorare bene gli schermi devono partire dal pavimento, avere tenuta verso terra (senza fessurazioni) e, come minimo, devono intercettare il suono diretto (sinistra). Il soffitto sopra lo schermo superiore deve essere fonoassorbente per non vanificare l'effetto dello schermo (destra)

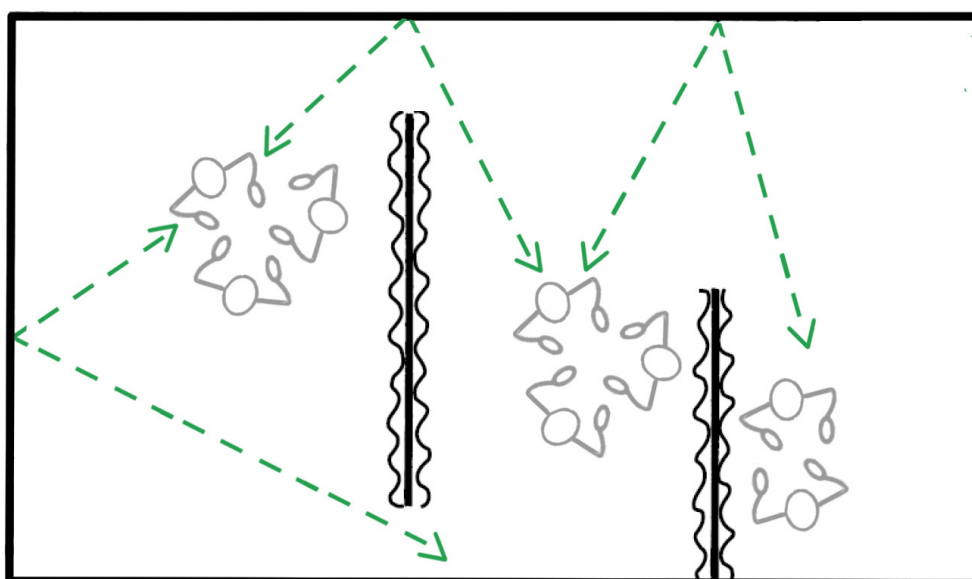


Figura 5.11 La presenza di superfici riflettenti laterali (es. vetrate o pareti perimetrali riflettenti) vanifica l'efficacia dello schermo

### 5.3 Le aule per gli allievi con problemi di udito

**D**ue sono i riferimenti che trattano in modo specifico la situazione di allievi con problemi di udito, di allievi con i quali l'apprendimento e la comunicazione avviene in una lingua diversa dalla madrelingua, di allievi che necessitano di una maggiore intelligibilità del parlato, di allievi con difficoltà di concentrazione, di allievi con sindrome da deficit di attenzione o iperattività, di allievi descritti nella Convenzione delle Nazioni Unite sui diritti delle persone con disabilità: il Building Bulletin 93<sup>3</sup> del Regno Unito e la norma tedesca DIN 18041.

Il Building Bulletin 93 ha un approccio pragmatico e diretto: il tempo di riverberazione nelle aule per gli allievi con problemi di udito e generalmente nelle aule per insegnamento inclusivo deve essere misurato in condizione di ambiente arredato ma non occupato e deve essere minore o uguale a 0,4 secondi; questo dato va calcolato come media aritmetica in frequenza nelle bande d'ottava da 125 Hz a 4 kHz o come media aritmetica da 100 Hz a 5 kHz in bande di terzi di ottava. Inoltre, in nessuna banda di ottava il tempo di riverberazione può superare 0,6 secondi.

La DIN 18041 richiede nei casi d'inclusione un tempo di riverberazione valutato in condizione di ambiente arredato e occupato per le bande di ottava 500 Hz e 1 kHz che dipende dal volume dell'ambiente. Il requisito va soddisfatto su tutto l'intervallo di frequenza. In particolare per un volume di 200 m<sup>3</sup> si richiede un tempo di riverberazione di 0,46 s. È definita una tolleranza del 20% nell'intervallo che comprende le bande dei 250 Hz e 2 kHz e maggiore nelle bande di frequenza nominale 125 Hz e 4 kHz.

Secondo il Building Bulletin 93, per quanto riguarda le aule didattiche non occupate, nel caso di bambini con deficit uditivo, il rumore di fondo ambientale interno non deve superare 30 dB(A) negli edifici nuovi e 35 dB(A) nel caso di ristrutturazioni di edifici esistenti. Il Building Bulletin 93 prevede delle correzioni per questi valori in base al sistema di ventilazione utilizzato.

Secondo la DIN 18041 il livello sonoro disturbante complessivo che agisce sugli ascoltatori presenti nell'ambiente durante il suo utilizzo, comprende il rumore proveniente dall'esterno, il rumore proveniente da attrezzature nell'aula ed il rumore degli occupanti presenti nell'aula. Il primo è quello provocato da tutte le sorgenti rumorose esterne, dalla rumorosità proveniente da locali adiacenti, da servizi ed impianti tecnici fissi, da servizi sanitari e da mezzi tecnici multimediali fissi, e deve essere inferiore a 35 dB(A). Il secondo si riferisce alla rumorosità ulteriore provocata da mezzi di riproduzione mobili per audio, video ecc. presenti all'interno dell'aula e deve essere anch'esso inferiore 35 dB(A). Per quanto riguarda il rumore prodotto dagli occupanti la norma non fissa valori di riferimento, ma fornisce solo indicazioni tecniche per ridurre tale contributo. La differenza tra il livello del segnale e del rumore, nelle diverse postazioni di ascolto in tutta l'aula, deve essere almeno 15 - 20 dB.

---

3 "Acoustic design of schools: performance standards" – Dicembre 2014.

## 5.4 Le sale conferenze

**A**l fine di conseguire una buona intelligibilità del parlato, indispensabile per la fruizione delle sale conferenze, occorre provvedere al controllo tanto del rumore quanto del campo sonoro.

Con riguardo alla prima questione (controllo del rumore), andranno tenute in considerazione le indicazioni generalmente valide per gli altri ambienti presenti in una struttura scolastica, volte a limitare il rumore proveniente dall'esterno, dagli ambienti adiacenti, dagli impianti a servizio dell'edificio e dalla strumentazione eventualmente presente nella sala (videoproiettore, computer, ecc.).

Il secondo obiettivo (controllo del campo sonoro) è raggiunto facendo uso dell'intera *palette* di strumenti normalmente a disposizione dell'acustico: assorbimento, diffusione, riflessione.

Il principio guida consiste nell'ottimizzazione del rapporto segnale-rumore SNR (differenza algebrica tra livello del segnale e livello del rumore, in decibel); occorre pertanto ricorrere ad un *design* acustico che salvaguardi le prime riflessioni, che si fondono al suono diretto e rafforzano il segnale, e che limiti la coda riverberante, che contribuisce invece ad aumentare il rumore.

Occorre inoltre tenere presente, sempre ai fini di una corretta progettazione acustica, che la maggior parte dell'energia sonora prodotta dal parlato è determinata dalle vocali, presenti soprattutto nelle bande d'ottava centrate a 250 Hz e 500 Hz, laddove l'intelligibilità del messaggio vocale è fornita dalle consonanti, che interessano principalmente la gamma di frequenze compresa tra i 2000 e i 4000 Hz.

Sulla base di quanto sin qui puntualizzato, il miglior approccio per diminuire il rumore e simultaneamente aumentare il segnale consiste nell'adozione delle misure di seguito descritte (Figura 5.12):

1. curare che le superfici che circondano la sorgente sonora siano riflettenti al fine di aumentare il livello apparente del parlatore: parete frontale e soffitto sopra il parlatore saranno pertanto lisce e riflettenti;
2. assicurare che le superfici (orizzontali e verticali) attorno al perimetro del soffitto siano assorbenti per diminuire la coda riverberante;
3. provvedere affinché la parte centrale del soffitto abbia caratteristiche fonodiffondenti, o riflettenti, così da aumentare il livello sonoro apparente del parlatore, idealmente su tutta la platea degli ascoltatori;
4. trattare con pannelli fonodiffondenti alle alte frequenze e fonoassorbenti alle basse il terzo centrale delle pareti laterali e della parete di fondo.

Pareti laterali e di fondo saranno pertanto così configurate: per un terzo dell'altezza, a partire dal basso, le superfici saranno riflettenti; il terzo centrale, come già evidenziato, sarà diffondente alle alte e assorbente alle basse frequenze; il terzo superiore sarà assorbente.

Occorre evitare il tipico errore di trattare l'intera area del soffitto con pannelli fonoassorbenti, il che può portare, tra l'altro, al manifestarsi/aggravarsi di problemi quali eco

ed echi ripetuti (*flutter echo*).

Nel caso sia installato un sistema elettroacustico di diffusione sonora, l'impianto andrà selezionato e configurato in modo che l'intelligibilità in termini di STI (Indice di Trasmissione del Parlato) sia superiore a 0,56 anche nei punti più sfavoriti (vedere la CEI EN 60268-16 per la misurazione e la DIN 18041 per i valori consigliati).

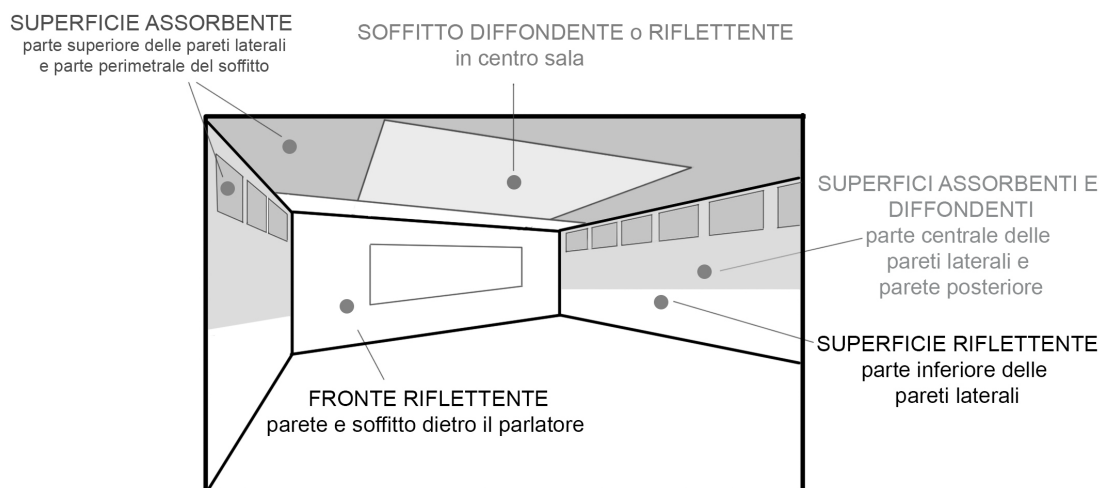


Figura 5.12 Disposizione dei materiali fonoassorbenti, fonoriflettenti e fonodiffondenti nella sala conferenze

## 5.5 I sistemi di amplificazione sonora

**S**ebbene le funzioni oggi attribuite ad un impianto di amplificazione e diffusione sonora per conferenze siano più numerose e complesse rispetto ad un tempo, ancora oggi la principale e più comune utilizzazione rimane l'amplificazione della voce di uno o più relatori e la sua diffusione al pubblico per mezzo di un sistema di altoparlanti.

La vecchia distinzione fra impianti destinati alla sola amplificazione della voce e quelli destinati anche alla diffusione musicale è oggi superata e il mercato offre prodotti di buona qualità a costi contenuti; ma se in ambito strettamente impiantistico si può dire che non esista sistema di amplificazione migliore degli altoparlanti che usa, in ambito applicativo si può altrettanto dire che non esista sistema di amplificazione migliore dell'acustica della sala che lo ospita, specialmente oggi. Come in precedenza accennato, infatti, la moderna prassi congressistica prevede spesso contributi audio-video di qualità, collegamenti da remoto ed altre applicazioni che richiedono adeguata fedeltà del suono ad ampio spettro.

### Tipologie e schemi principali

Il risultato ottimale che si dovrebbe ottenere da un impianto di amplificazione e diffusione sonora è quello di una elevata fedeltà nella riproduzione della voce e dei contenuti audio, ma soprattutto la coerenza fra la percezione del suono e la posizione del o dei relatori. Si dovrebbe in pratica ottenere il risultato di udire la voce del relatore

come proveniente dal relatore stesso anche se diffusa da più altoparlanti, così come si dovrebbe ottenere il risultato di percepire come correttamente proveniente dallo schermo il sonoro di un filmato o di altro contributo audio-video.

Sarebbe quindi preferibile collocare gli altoparlanti in corrispondenza del palco/pedana dei relatori, concentrando così l'origine dell'emissione sonora nella stessa area occupata dagli oratori e di conseguenza agevolando il meccanismo di correlazione fra visione ed ascolto da parte degli spettatori. Una scelta logica, ma non sempre facile da mettere in pratica specialmente se l'acustica della sala è deficitaria.

## Considerazioni pratico-applicative

Da quanto esposto nei paragrafi precedenti, risulta che il miglior compromesso fra costi e benefici si ottiene con un impianto di amplificazione e diffusione basato su una efficace irradiazione frontale originata sul palco, eventualmente integrata da una o due linee di irradiazione opportunamente sincronizzate in tempo e livello disposte lungo la sala, quando questa è di dimensioni superiori ai 30 - 40 metri in lunghezza. Premessa a tutto questo è naturalmente che la sala non presenti problemi acustici ed anzi favorisca una diffusione omogenea e tonalmente equilibrata del suono sul pubblico.

Una delle tecnologie di maggior successo attualmente sul mercato, adottata da molti costruttori, è quella dei "line-array": sistemi di altoparlanti montati a colonna ricurva e sospesi in quota in corrispondenza della linea di palco. Si tratta di sistemi modulari, costituiti da elementi progettati per essere assemblati in funzione delle necessità di pressione sonora ed area di copertura, dotati di caratteristiche di direttività controllate ed elettroniche di amplificazione e controllo dedicate. La flessibilità di allestimento rende questi sistemi adatti ad un vastissimo campo di applicazioni, dalla conferenza al concerto, e gli strumenti di calcolo e progettazione messi a disposizione dagli stessi costruttori consentono di raggiungere prestazioni ottimali ed ottimizzate per ogni situazione.

Anche se i software di progettazione aiutano già nello studio della esatta collocazione degli array, si può comunque suggerire l'impiego di un terzo array centrale quando la larghezza del palco supera i 10 - 15 metri, specialmente a beneficio delle prime file, nei cui posti centrali la percezione sarebbe troppo marcata lateralmente, ed in generale a beneficio della coerenza nella percezione del "centro". La presenza di un altoparlante centrale, regolato con un livello leggermente maggiore rispetto a quelli laterali, "aggancia" la percezione del suono al centro del palco migliorando in tal modo la coerenza del tutto.

## Indicazioni di massima per il calcolo e il collaudo

Allo stato attuale, un adeguato impianto di amplificazione e diffusione del suono deve assicurare alla platea un livello medio di pressione sonora di almeno 80 - 85 dB(C), con possibilità di raggiungere senza distorsioni livelli transitori di 95 - 100 dB(C), riferiti ad un segnale ad ampio spettro (tipo rumore rosa)<sup>4</sup> applicato in ingresso a livello standard di

4 il rumore rosa (*pink noise*): è un rumore che ha la stessa energia per ogni banda di ottava.

linea (0.775 - 1.0 Vrms). Possono essere tollerate differenze di  $\pm 3$  dB fra diverse zone della sala ed una generale riduzione del livello, procedendo verso il fondo, di 5 - 10 dB. Un buon risultato si può pertanto considerare raggiunto quando l'impianto di diffusione sonora riesce a produrre un livello medio di pressione sonora, riferito ad un rumore rosa esteso almeno da 100 Hz a 8000 Hz, variabile fra 90 e 75 dB(C) procedendo dalla prima fila verso il fondo della sala, con variazioni contenute entro  $\pm 3$  dB. Dato che i sistemi di altoparlanti disponibili oggi in commercio presentano caratteristiche di efficienza abbastanza variabili, fra i 90 e i 100 dB/1W/1m, si preferisce lasciare il dettaglio del calcolo della potenza necessaria ai casi specifici, con il supporto delle schede tecniche e dei software di progettazione, raccomandando però di tener conto che ad ogni 3 dB di pressione sonora in più, richiesta in sala, corrisponde un raddoppio della potenza di amplificazione necessaria. Attenzione quindi a non sottodimensionare la potenza di amplificazione, pena una prestazione insoddisfacente ed una fine prematura degli altoparlanti, costretti a lavorare in condizioni di elevata distorsione con conseguente stress termico delle bobine mobili.

I materiali oggi disponibili in commercio assicurano generalmente adeguate caratteristiche di qualità e fedeltà del suono, almeno per quanto riguarda la riproduzione della voce. Una risposta in frequenza lineare entro  $\pm 3$  dB fra 100 Hz e 8 kHz, con *roll-off* dell'ordine di 6 dB/ottava all'esterno di tale banda, assicura un'adeguata riproduzione della voce e di eventuali contenuti musicali di commento. Nel caso fossero previste applicazioni che necessitano di "alta fedeltà" e maggiore impatto per contenuti musicali più importanti, rimane la possibilità di integrare il sistema con una estensione bassi (subwoofer), preferibilmente costituita da un unico elemento o gruppo di elementi in posizione centrale rispetto al sistema di diffusione. È consigliabile non distanziare i subwoofer o distribuirli in sala: risulterebbe poi problematico se non impossibile allinearne temporalmente le emissioni e/o allinearle con quelle degli altoparlanti principali.

Il collaudo e l'accettazione dell'impianto fanno riferimento alla misura dello STI in accordo con la CEI EN 60268 -16.

## 5.6 La correzione acustica delle mense

**L**e mense presenti nelle strutture dedicate all'istruzione soffrono principalmente dell'eccessiva rumorosità dovuta al rumore antropico (chiacchiericcio dei commensali).

In tali ambienti sono raggiunti livelli sonori ragguardevoli, anche in ragione del fenomeno, noto come *Effetto Lombard*, per cui chi si trova in un locale affollato tende ad aumentare il livello del (proprio) parlato per competere con il rumore ambientale, originato dalla conversazione delle altre persone (si veda nota a piè della pagina 38). Poiché tale effetto si manifesta, indicativamente, a partire dai 45 dB(A) di livello di rumore ambientale, tutte le mense ne sono sistematicamente affette.

Anche nei casi di cui si tratta, pur non rappresentando l'esigenza primaria, andrà posta la necessaria cura affinché il rumore impiantistico non raggiunga livelli tali da



interferire con la normale conversazione e, comunque, con la normale fruizione della sala; andrà altresì limitata la trasmissione di rumore da e verso gli ambienti adiacenti; i rumori provenienti dalle cucine, ad esempio, possono essere caratterizzati da notevole energia sonora e presentare carattere impulsivo/impattivo.

In ogni caso, la principale esigenza progettuale è senz'altro rappresentata dal controllo del campo sonoro mediante la corretta definizione delle strutture primaria (geometria) e secondaria (superfici di rivestimento).

Con riguardo al primo aspetto, molto spesso le mense sono configurate come ambienti vasti e regolari, con grandi superfici piane, acusticamente riflettenti e tra loro parallele, e con ampie finestrate, con ciò favorendo l'instaurarsi di onde stazionarie (si veda pag.63) ed eventualmente del fastidioso fenomeno noto come *flutter echo*. Sempre relativamente alla geometria, sono da evitare superfici concave, quali quelle rappresentate da soffitti a volta o da pareti verticali curve; se presenti, queste dovranno essere adeguatamente trattate acusticamente.

In tutti i casi, è importante che l'analisi della correzione acustica dell'ambiente, da conseguire mediante introduzione di materiale fonoassorbente (ed eventualmente fonodiffondente), tenga conto non solo della quantità, ma anche della disposizione di detto materiale.

L'approccio più semplice alla progettazione acustica è quello guidato dall'obiettivo di conseguire tempi di riverberazione consoni alle prescrizioni di legge, ovvero a quanto previsto da linee guida, manuali di buona pratica, letteratura tecnica e scientifica, ecc. In tal caso è possibile l'utilizzo di formule semplificate (ad es. Sabine o Eyring). Vista l'accuratezza non particolarmente spinta di tale approccio, è buona norma effettuare mirate sessioni di verifica strumentale ad opere ultimate (ad ambienti non occupati). Occorre in ogni caso tenere presente che, in generale, il tempo di riverberazione non dovrebbe superare il valore di un secondo (mediato nelle bande d'ottava di frequenza nominale 500 Hz e 1000 Hz) e si dovrebbero adottare tutte le misure concretamente attuabili per ridurlo il più possibile, evitando di agire solo sulla superficie del soffitto.

L'approccio modellistico risulta, di fatto, necessario qualora l'obiettivo della progettazione sia posto, direttamente, in termini di livello desiderabile di rumore antropico nella condizione (più gravosa) di ambiente totalmente occupato, e non relativamente al tempo di riverberazione.

In tal caso lo specialista in acustica dovrà realizzare un modello considerando:

1. le caratteristiche della struttura primaria e secondaria dell'ambiente;
2. la capienza fisica della mensa.

Al fine di pervenire al risultato cercato, dovranno quindi essere prodotte credibili ipotesi in termini di numero di persone medio per parlatore e di sforzo vocale del parlatore, definito della norma UNI EN ISO 9921. Un approccio al problema, che tiene conto del citato *Effetto Lombard*, è esplicitato e descritto in *Rindel et al. (2012)*<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Rindel et al., "Dynamic sound source for simulating the Lombard effect in room acoustic modelling software", Internoise 2012, New York City, USA.



La verifica strumentale dei calcoli svolti potrà in questo caso essere effettuata ad ambiente occupato, per un tempo rappresentativo, con riferimento al descrittore rappresentato dal livello continuo equivalente, possibilmente rilevato nelle bande d'ottava da 125 Hz a 8 kHz. L'acquisizione dello spettro di rumore da misure in opera consente il confronto con gli spettri definiti dalla citata UNI EN ISO 9921, al fine di verificare il tipo di "sforzo vocale" (rilassato, normale, elevato, forte, molto forte), cui sono soggetti i parlatori nell'ambiente in questione; il che rappresenta un'informazione di notevole interesse.

## 5.7 La correzione acustica delle palestre e delle piscine

Secondo diversi studi che si basano sia su indagini soggettive (risposte di docenti di Educazione fisica a specifiche domande su problematiche ambientali) sia su indagini oggettive (misure fonometriche per la valutazione dell'esposizione al rumore di allievi e docenti, misure della riverberazione), le palestre scolastiche sono ambienti su cui pende un giudizio fortemente negativo per le prestazioni acustiche. Le lamentele sottolineano quasi sempre una eccessiva difficoltà nella comunicazione agli allievi delle più semplici istruzioni e una eccessiva rumorosità che, a detta degli interessati, si trasforma in "senso di oppressione" e "mal di testa". Le indagini fonometriche hanno peraltro evidenziato che una percentuale alta (intorno all'80%) di docenti di Educazione Fisica presenta un livello di esposizione settimanale al rumore superiore a 75 dB(A) mentre per il 25% del campione esaminato il livello di esposizione settimanale al rumore può essere addirittura superiore a 80 dB(A) (condizione di rischio).

Le fonti principali di rumore all'interno delle palestre scolastiche sono appunto le attività sportive: rimbalzi di palle, richiami, grida, corse, ecc. a cui troppo spesso si accompagna l'uso di fischietti da parte dei docenti. Questa rumorosità è crescente con il numero di persone presenti ed è ulteriormente alimentata dal fatto che, in genere, si tratta di ambienti riverberanti in quanto particolarmente spogli e in cui, per il costante utilizzo, si preferisce sin dall'inizio l'uso di materiali di semplice manutenzione ma nel contempo poco fonoassorbenti (intonaci lisci, linoleum, cemento a faccia vista, ecc.).

La correzione acustica di questi ambienti può essere facilmente realizzata con l'utilizzo di materiali rigidi, robusti, resistenti all'umidità e igienici ma nel contempo anche fonoassorbenti specie nel campo delle medio-alte frequenze. Questi materiali potranno essere applicati a soffitto e per quanto possibile alle pareti laterali. Per queste ultime sarebbe preferibile, al fine di ridurre l'estensione del rivestimento fonoassorbente e migliorare l'intelligibilità, allocare i pannelli fonoassorbenti entro i 3 m dal pavimento. Ulteriore attenzione deve essere rivolta ai fenomeni di eco che si possono facilmente innescare in ambienti molto grandi e con superfici perfettamente parallele. Per questo è opportuno che il rivestimento fonoassorbente non sia distribuito uniformemente lungo le pareti laterali e che lo stesso presenti superficialmente anche rilievi e scanalature per aumentare le caratteristiche di diffusione del suono.

Accanto a questi interventi strutturali e di finitura con materiali fonoassorbenti e fonodiffondenti e al fine di ridurre più efficacemente i problemi di rumorosità occorre

prendere ulteriori precauzioni. È opportuno evitare che più classi scolastiche frequentino in contemporanea la palestra, ma se ciò è inevitabile per motivi logistici e organizzativi è allora necessario ridurre al minimo gli sport con l'uso di palloni che rimbalzano continuamente. È necessario altresì vietare l'uso dei fischietti da parte dei docenti di educazione fisica; potranno in alternativa essere utilizzati per impartire istruzioni e/o richiamare l'attenzione microfoni portatili e sistemi di amplificazione diffusa.

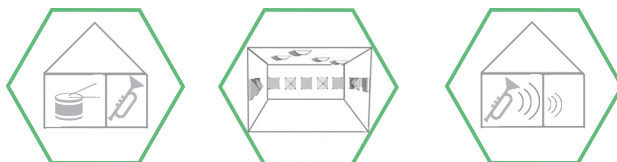


# 6. LE AULE PER LA MUSICA

---

## CONTENUTI

---



---

ROBERTO FURLAN

<http://orcid.org/0000-0002-0377-0444>

ALESSIA GRIGINIS

<http://orcid.org/0000-0001-7074-8688>

---

Lo studio della musica dipende fundamentalmente dalla capacità di ascoltare e di imparare le differenze di intonazione, le dinamiche, l'articolazione e l'equilibrio. Tale abilità può essere sviluppata solo in un ambiente di apprendimento caratterizzato da una corretta acustica. I principali fattori che possono influire negativamente sulle prestazioni acustiche di aule destinate alle pratiche musicali riguardano la trasmissione del rumore tra ambienti adiacenti, il rumore proveniente dall'esterno dell'edificio, la generazione di eccessivi livelli sonori generati dall'utilizzo degli strumenti musicali e una riverberazione inadeguata degli ambienti interni. Al fine di garantire le condizioni acustiche adeguate allo svolgimento di attività di educazione musicale, in fase di progettazione, occorre tenere in considerazione i seguenti aspetti: la distribuzione degli spazi, il volume e la forma delle aule, il trattamento acustico interno degli ambienti, l'isolamento acustico e il contenimento della rumorosità degli impianti.

## 6.1 Le caratteristiche architettoniche degli spazi

Un ordinario programma didattico musicale prevede che vengano svolte, contemporaneamente e nello stesso edificio diverse attività, quali lezioni, prove, pratiche individuali, studi ed esecuzioni. Proprio in conseguenza a questa varietà di attività, le aule a disposizione degli studenti devono essere in grado di adeguarsi nel modo ottimale ad esigenze differenti. Programmare preventivamente le attività che andranno svolte nei vari spazi permette di definire quali dovranno essere i caratteri comuni a tutti e quali, invece, andranno a contraddistinguere solo alcuni di questi<sup>6</sup>.

La distribuzione delle aule per la musica all'interno di un complesso scolastico costituisce un importante aspetto da considerare in fase di progettazione, in quanto permette di evitare interferenze fastidiose tra ambienti a diversa destinazione; l'inserimento di ambienti "cuscinetto"/filtro come i corridoi di distribuzione o i depositi, possono essere utili ad isolare tra loro gli spazi che necessitano di un maggior grado di isolamento (Figura 6.1).

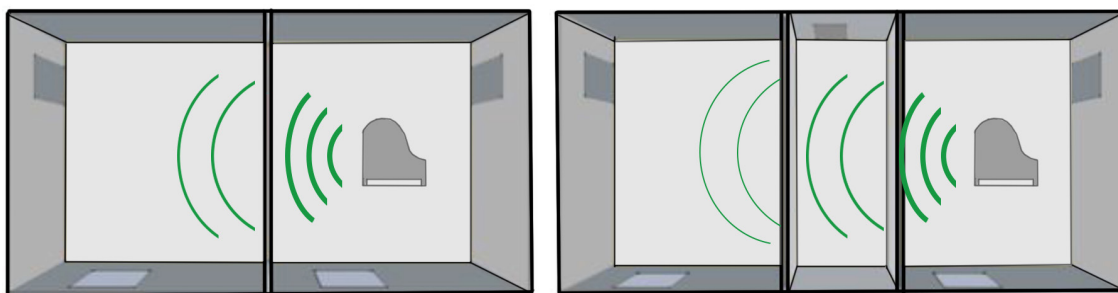


Figura 6.1 Effetto della presenza di spazi filtro sulla propagazione del rumore tra aule musica adiacenti

Nella progettazione degli spazi interni, inoltre, è fondamentale stabilire se le aule destinate alla pratica musicale saranno distribuite su un unico piano o su più piani, soprattutto al fine di dimensionare in maniera corretta le prestazioni fonoisolanti dei componenti edilizi interni. Infatti, nel caso in cui la distribuzione degli ambienti per la musica sia prevista su più piani, occorre considerare che l'isolamento acustico tra ambienti sovrapposti può essere particolarmente critico e comportare un notevole incremento dei costi di costruzione.

Infine, nel caso in cui si debba prevedere la funzionalizzazione di edifici esistenti, è necessario progettare gli spazi in modo tale che siano sostenibili sia dal punto di vista funzionale che dell'isolamento acustico fra ambienti adiacenti.

Oltre alla qualità acustica e alla distribuzione degli ambienti è importante definire anche le loro caratteristiche architettoniche come la dimensione ideale e l'arredo necessario per le varie attività.

6 "Music accomodation in secondary school. A design guide." Department of Education, NBS, 2010.

## Volume, forma e proporzione delle aule

La corretta progettazione di spazi dedicati allo studio e alla pratica musicale deve prevedere la disponibilità di spazi di diverse dimensioni per permettere lo svolgimento delle differenti attività sopracitate.

Nella Tabella 6.1 si riportano alcune indicazioni di massima per il corretto dimensionamento delle aule in funzione delle attività a cui destinarli.

Tabella 6.1 Dimensionamento del volume ai fini acustici

| Attività                          | Capienza Massima | Superficie di pavimento    |
|-----------------------------------|------------------|----------------------------|
| Pratica e prove individuali       | 1 studente       | circa 3 - 4 m <sup>2</sup> |
| Lezione privata                   | 2 studenti       | circa 5 m <sup>2</sup>     |
| Pratica e prove di piccoli gruppi | 4 studenti       | circa 7 m <sup>2</sup>     |
| Pratica e prove di gruppi medi    | 6 studenti       | circa 9 m <sup>2</sup>     |
| Prove e lezioni di gruppo         | 15 studenti      | da 30 a 40 m <sup>2</sup>  |

Il volume, la forma e le proporzioni degli ambienti influiscono notevolmente sulla loro qualità acustica (Figura 6.2). Un adeguato volume è fondamentale al fine di garantire che le prime riflessioni del suono giungano all'ascoltatore (musicista) con un ritardo di tempo tale da consentirgli di provare una sensazione di avvolgimento e spazialità. In ambienti troppo piccoli si verificano condizioni per cui i musicisti non sono in grado di udire l'intera gamma dei toni musicali e gli strumenti musicali generano livelli sonori troppo elevati che possono causare stati di stress sia negli allievi che negli insegnanti, oltreché provocare perdite permanenti di udito in seguito ad esposizioni prolungate. In particolare le aule per la musica devono essere caratterizzate da un volume maggiore rispetto alle normali aule scolastiche. Indicativamente un'aula per la musica deve essere caratterizzata da un volume superiore ai 63 m<sup>3</sup>, con un'altezza ottimale compresa tra 4 - 5 m.

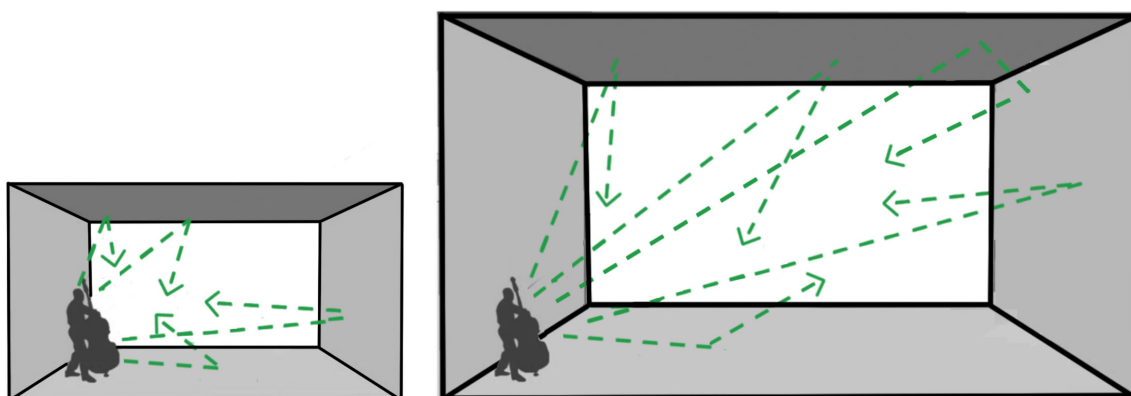


Figura 6.2 L'importanza del volume per le aule per la musica. In aule troppo piccole le prime riflessioni del suono arrivano all'ascoltatore entro i primi 30 millisecondi, rendendo il livello sonoro eccessivamente elevato. In aule caratterizzate da un adeguato volume le prime riflessioni sono leggermente ritardate e avvolgono il musicista

La forma, le proporzioni e la geometria dell'ambiente influiscono sulla distribuzione del suono al suo interno. In particolare, in aule di forma parallelepipedica o cubica con pareti piane, parallele e riflettenti, è ben udibile l'instaurarsi di onde stazionarie<sup>7</sup>, ad ognuna delle quali corrisponde un modo normale di vibrazione<sup>8</sup> dell'ambiente. Quando la frequenza del suono emesso dalla sorgente eguaglia la frequenza di uno dei modi normali di vibrazione dell'ambiente, l'ambiente va in risonanza ed esalta quella particolare frequenza rispetto alle altre, determinando la formazione di massimi e minimi di livello sonoro ben udibili nello spazio. Tale fenomeno è ben udibile in caso di suoni a bassa frequenza. Per ottenere una più uniforme distribuzione del livello sonoro all'interno dei piccoli ambienti è dunque opportuno far sì che tra le dimensioni non sussistano rapporti numerici esatti.

## 6.2 Il trattamento acustico delle aule

**D**isturbi nell'ascolto possono essere causati anche da superfici concave riflettenti che concentrano il suono in determinati punti dell'aula, provocando disomogeneità di ascolto fra diverse posizioni.

Per attenuare l'effetto delle onde stazionarie, così come quando non è possibile evitare superfici concave, in fase di intervento è consigliabile prevedere rivestimenti con materiale fonoassorbente e fonodiffondente (Figura 6.3). Inoltre in ambienti parallelepipedici per evitare l'instaurarsi di fenomeni di *flutter echo*, è consigliabile evitare superfici piane e parallele non trattate (soffitto-pavimento, pareti laterali delle aule).

In generale nelle aule destinate alla pratica musicale la differenziazione del trattamento superficiale delle pareti costituisce un elemento molto utile per il controllo della risposta acustica dell'ambiente. La corretta distribuzione delle superfici fonoassorbenti e fonodiffondenti infatti consente di ottimizzare la distribuzione del segnale sonoro nello spazio e nel tempo.

L'impiego di materiali fonoassorbenti è funzionale al fine di contenere il tempo di riverberazione entro valori ottimali. La quantità di materiale fonoassorbente necessaria può essere calcolata utilizzando l'equazione Sabine o di Eyring. La distribuzione dei materiali fonoassorbenti in corrispondenza delle diverse superfici dovrebbe essere il più

<sup>7</sup> Quando una sorgente inizia a funzionare all'interno di un ambiente parallelepipedico con pareti piane, riflettenti e parallele, le onde sonore si diffondono in tutte le direzioni e si riflettono avanti e indietro sulle pareti, sia interessando coppie di pareti opposte, sia interessando le diverse pareti secondo vari angoli di incidenza. Ci saranno percorsi che si ripeteranno uguali nel tempo creando delle onde stazionarie. Un'onda stazionaria è un'onda che non si propaga, ma rimane sempre nella stessa zona di spazio. Ciò accade in particolare quando le onde si propagano avanti e indietro tra una coppia di pareti opposte e la distanza fra le due pareti è pari ad un multiplo di semilunghezza d'onda, ma si creano onde stazionarie anche tra le diverse pareti con onde che incidono secondo determinati angoli di incidenza.

<sup>8</sup> Quando si genera un'onda stazionaria, la condizione che si verifica individua un modo normale di vibrazione dell'ambiente, la cui frequenza è detta frequenza normale. Le frequenze dei modi normali corrispondono alle frequenze di risonanza dell'ambiente.



uniforme possibile per evitare l'insorgere di dissimmetrie nella riflessione delle onde sonore.

A tal proposito si evidenzia che, poiché la presenza di persone costituisce un significativa quantità di assorbimento acustico (concentrata per lo più nella parte bassa dell'ambiente), generalmente all'interno di un'aula per la musica il materiale fonoassorbente viene distribuito a soffitto o nella parte alta delle pareti laterali. Questo è anche il motivo per cui generalmente i valori ottimali del tempo di riverberazione per le aule di musica si intendono valutati ad ambiente arredato, ma non occupato.

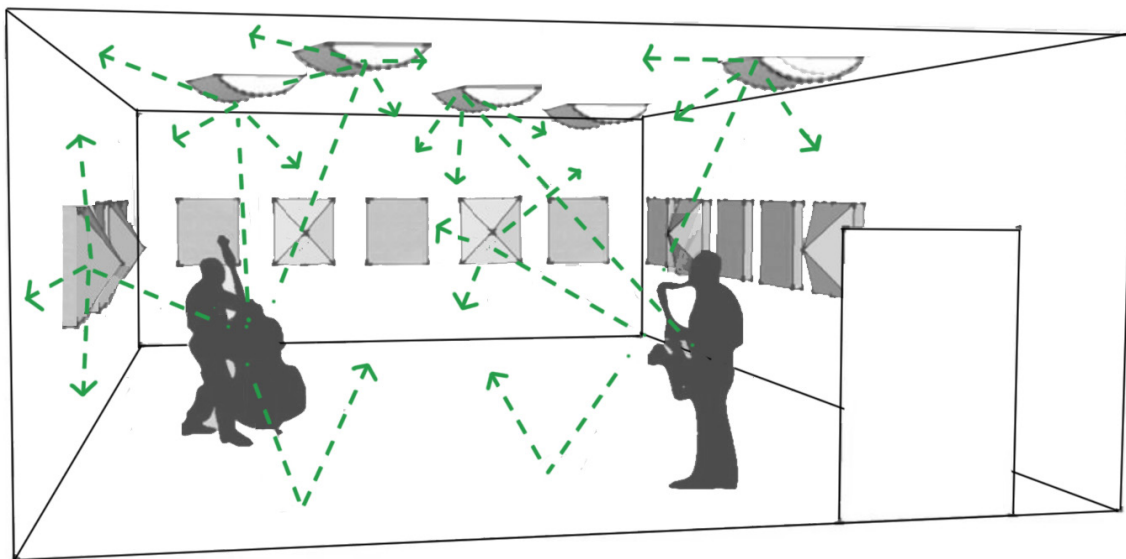


Figura 6.3 Riflessioni del suono in un'aula con trattamento acustico fonoassorbente e fonodiffondente

L'impiego di sistemi fonodiffondenti invece è indispensabile per assicurare la diffusione uniforme delle onde sonore. In presenza di un adeguato coefficiente di diffusione, infatti, si possono prevedere tempi di riverberazione leggermente maggiori, senza compromettere l'articolazione del segnale, aspetto assolutamente apprezzato da chi suona. Sistemi fonodiffondenti sono costituiti da superfici convesse o superfici caratterizzate dalla presenza di irregolarità in grado di deviare la riflessione del suono. Altri sistemi fonodiffondenti sono costituiti, ad esempio, dai diffusori di Schroeder, elementi geometrici scanalati o profilati con sporgenze e rientranze, dimensionati appositamente a seconda delle frequenze che devono essere diffuse. Le irregolarità che li caratterizzano hanno profondità differenti per permettere riflessioni a varie frequenze e su diversi angoli, garantendo una sensazione di maggior diffusione del suono.

Un altro aspetto fondamentale da considerare al fine di ottenere una corretta risposta acustica all'interno di aule destinate alla pratica musicale è il controllo delle basse frequenze. Le aule, infatti, possono in generale essere classificate fra gli ambienti acusticamente piccoli, le cui dimensioni sono paragonabili alle lunghezze d'onda di suoni di frequenza medio-bassa, mediamente presenti nelle emissioni degli strumenti musicali e della voce. In presenza di energia sonora contenente suoni di frequenza medio-bassa (sotto il Do centrale del pianoforte, indicativamente), si osserva un fenomeno di "permanenza" dei suoni in ambiente dovuto al formarsi di onde stazionarie. Come già riportato

nel paragrafo precedente, l'ambiente va in risonanza e il livello di questi suoni risulta non uniforme nella stanza, ma si esalta in determinati punti e svanisce in determinati altri, seguendo un andamento a massimi e minimi che altera la corretta percezione da parte dei presenti. Verificate quali siano le frequenze di risonanza di una specifica aula, la progettazione deve considerare l'eventuale necessità di installare dispositivi di assorbimento delle basse frequenze (trappole acustiche). Tali dispositivi sono costituiti, ad esempio, da un pannello rigido perforato con retrostante strato di materiale fonoassorbente a formare con le pareti rigide retrostanti un risuonatore di Helmholtz.

Trappole di questo tipo possono essere realizzate in diverse fogge, adatte comunque ad una collocazione agli angoli della stanza, ove il loro rendimento è maggiore e l'ingombro minore. Esse possono essere conformate a colonna a base quadrata o circolare, oppure collocate obliquamente ad angolo.

### 6.3 L'isolamento acustico delle aule

Per condizioni ottimali di comfort acustico si intende, oltre al controllo della risposta acustica degli ambienti (principalmente in riferimento al tempo di riverberazione), la garanzia di isolamento acustico tra ambienti adiacenti e nei confronti dell'ambiente esterno. Per quanto riguarda l'isolamento si sottolinea che D. C. Lamberty (1980)<sup>9</sup> in un'indagine condotta in riferimento al livello di rumore di fondo all'interno delle aule per lo studio della musica, riscontrò che la maggior parte degli studenti riconoscono di essere disturbati principalmente dal rumore di fondo prodotto dalla pratica di altri strumenti in ambienti adiacenti.

Uno strumento musicale, infatti, può essere caratterizzato da livelli di potenza sonora molto elevati, di conseguenza, il livello sonoro che si genera all'interno di ambienti di piccole dimensioni può essere a sua volta molto rilevante; tale livello inoltre può variare di molto in funzione dello strumento suonato.

A tal proposito le esigenze che risultano prioritarie al fine di conseguire condizioni acustiche ottimali sono quelle di isolare adeguatamente gli spazi e prevedere l'inserimento di spazi cuscinetto di servizio tra le aule (Figura 6.1), oltreché ridurre l'intensità del suono che può propagarsi da un ambiente, incrementando il trattamento fonoassorbente delle aule (ma non oltre quanto richiesto per ottenere il tempo di riverberazione ottimale).

Per le pareti di un'aula di musica, poiché le esigenze di isolamento acustico sono molto elevate, sia per quanto riguarda il disturbo proveniente dall'esterno, sia per la riduzione delle emissioni sonore verso l'esterno, sono richieste tramezzature caratterizzate da un alto valore dell'indice di valutazione del potere fonoisolante (indicato con  $R_w$  ed espresso in decibel). Le pareti, inoltre, presentano dei "punti deboli" rappresentati dalle porte. Questi elementi sono responsabili di grandi perdite di potere fonoisolante, pertanto occorre scegliere soluzioni che non pregiudichino le maggiori prestazioni dell'involucro opaco. Per l'isolamento rispetto ai rumori prodotti da urti è necessario che le strutture

9 D.C. Lamberty (1980), "Music Practice Rooms", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 2, 434-467.

di separazione, sia orizzontali che verticali, siano il più possibile disgiunte fra di loro, in modo da ridurre la propagazione sonora per via solida attraverso le strutture stesse. Al fine di raggiungere questi obiettivi la soluzione migliore è quella di realizzare un doppio involucro, la cosiddetta “box in a box”, con doppie pareti completamente disaccoppiate in modo da annullare le trasmissioni laterali del suono. Dove non è possibile realizzare un doppio involucro, a causa della preesistenza delle strutture di involucro dell’edificio o dei ridotti volumi a disposizione, è opportuno studiare stratigrafie in grado di garantire elevate prestazioni fonoisolanti. Per l’isolamento dai rumori provenienti dall’esterno dell’edificio è necessario che i serramenti siano caratterizzati da elevate prestazioni fonoisolanti, oppure prevedere l’installazione di un doppio serramento.

In particolare, nella definizione delle prestazioni di isolamento dei componenti edilizi, si dovrebbero tenere in considerazione i livelli sonori generati dalle diverse attività musicali e il conseguente disturbo, oltre al fatto che sempre più spesso l’offerta formativa in ambito musicale propone repertori di musica Jazz e pop, con impiego di strumentazione amplificata quali basso, chitarra e tastiere, e della batteria, per cui i requisiti di isolamento acustico devono risultare particolarmente stringenti.

Tabella 6.2 Livelli sonori tipici di strumenti musicali

| Strumento    | Livello equivalente di pressione sonora ponderata A, $L_{Aeq}$ , durante un’esercitazione individuale |
|--------------|---|
| Violino      | 90 dB(A)  |
| Viola        | 90 dB(A)  |
| Violoncello  | 84 dB(A)  |
| Contrabbasso | 81 dB(A)  |
| Arpa         | 87 dB(A)  |
| Clarinetto   | 92 dB(A)  |
| Oboe         | 85 dB(A)  |
| Fagotto      | 87 dB(A)  |
| Flauto       | 91 dB(A)  |
| Corno        | 93 dB(A)  |
| Tromba       | 93 dB(A)  |
| Trombone     | 96 dB(A)  |
| Tuba         | 93 dB(A)  |
| Batteria     | 93 dB(A)  |

Nelle nuove linee guida del Ministero dell’Istruzione per la progettazione interna dell’edilizia scolastica (Aprile 2013)<sup>10</sup> si specifica che nella progettazione degli edifici scolastici è necessario prevedere una sala musica con strumenti per la registrazione,

<sup>10</sup> MIUR, 2013. Norme tecniche-quadro, contenenti gli indici minimi e massimi di funzionalità urbanistica, edilizia, anche con riferimento alle tecnologie in materia di efficienza e risparmio energetico e produzione da fonti energetiche rinnovabili, e didattica indispensabili a garantire indirizzi progettuali di riferimento adeguati e omogenei sul territorio nazionale.

sistemata in posizione tale da non creare disturbo alle altre attività ad accuratamente isolata acusticamente (...), oltreché la presenza di atelier musicali, anch'essi isolati acusticamente con materiali adeguati.

Il Decreto del Presidente della Provincia Autonoma di Bolzano del 7 luglio 2008, n. 26, all'art. 5 specifica che i requisiti acustici richiesti per le aule di musica sono più elevati rispetto a quelli richiesti per le altre aule e che devono essere garantiti sia l'isolamento acustico verso l'esterno che quello tra le singole aule.

Inoltre, definisce in maniera specifica i requisiti acustici che devono essere conseguiti in opera per i differenti elementi costruttivi (pareti divisorie, porte, finestre e solai). Vengono infine indicati i principi che devono essere rispettati in fase di progettazione e di esecuzione delle opere per il conseguimento dei requisiti acustici specificati.

In generale, gli interventi necessari per garantire condizioni acustiche ottimali per lo studio della musica possono essere così riepilogati:

- realizzazione di pavimentazioni galleggianti su solette di nuova realizzazione o esistenti, mediante sistema massa-molla-massa, in grado di garantire un abbattimento acustico sull'intero spettro di emissione degli strumenti musicali, sia per quanto riguarda la propagazione del suono sia per via aerea sia per via strutturale;
- realizzazione di contropareti e controsoffitti fonoisolanti con lastre in cartongesso e gesso-fibra. Si consiglia la realizzazione di partizioni inclinate, al fine di evitare la presenza di superfici piane parallele;
- realizzazione di nuovi tramezzi con elementi costruttivi caratterizzati da elevata massa per unità di superficie accoppiati a contropareti leggere;
- realizzazione di pareti vetrate antisfondamento mediante vetrocamera ad elevata intercapedine d'aria e doppie lastre di vetro con stratificazione antirumore;
- installazione di porte di accesso ai locali ad elevato isolamento acustico;
- installazione di contro-serramenti realizzati con vetrocamera e doppie lastre di vetro con stratificazione antirumore.

In aggiunta a quanto elencato si sottolinea l'importanza di curare la posa in opera durante l'esecuzione delle opere per evitare la formazione di ponti acustici, soprattutto in corrispondenza del passaggio di eventuali canalizzazioni di impianti tecnologici (si veda il capitolo 4).

Infine, un altro aspetto fondamentale da considerare nella progettazione degli spazi destinati alla pratica musicale è il controllo del rumore ambientale. Il livello di rumore ambientale può essere dovuto al rumore proveniente dall'esterno dell'aula, dal rumore prodotto da impianti tecnologici a servizio dell'edificio, oppure da una combinazione di entrambi.

Per quanto riguarda gli spazi che sono ventilati naturalmente, di solito tramite la semplice apertura delle finestre, è probabile che il rumore proveniente dall'esterno sia dominante. Una simile situazione può essere accettabile quando l'edificio si trovi in un area caratterizzata da un clima acustico ottimale. In contesti più rumorosi, dove il livello del rumore esterno sia superiore a 50 dB(A), è necessario prevedere l'inserimento di dispositivi di attenuazione acustica o la ventilazione meccanica.

Per quanto riguarda il rumore degli impianti meccanici è fondamentale rispettare le indicazioni riportate nel capitolo 4.

Per quanto riguarda i livelli sonori di rumore di fondo ammissibili nei diversi spazi in funzione della loro destinazione d'uso, negli spazi comuni è tollerabile un livello di rumore di fondo di 40 - 45 dB(A); nelle aule di lezione è generalmente accettabile un livello pari a 35 - 40 dB(A), mentre le aule attrezzate e/o destinate alla registrazione audio dovrebbero essere protette dai rumori esterni a livello "studio-grade", per cui dovrebbero essere segregate rispetto alle altre aule e con livelli di fondo non superiori a 25 - 30 dB(A).



# **ALLEGATO**

NORME TECNICHE DI  
RIFERIMENTO



I seguenti riferimenti non sono datati in quanto si intende valga l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento (compresi gli aggiornamenti).

## **Norme per il progetto**

- UNI EN 12354-1, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti
- UNI EN 12354-2, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento acustico al calpestio tra ambienti
- UNI EN 12354-3, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Isolamento acustico contro il rumore proveniente dall'esterno per via aerea
- UNI EN 12354-4, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Trasmissione del rumore interno all'esterno
- UNI EN 12354-5, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 5: Livelli sonori dovuti agli impianti tecnici
- UNI EN 12354-6, Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni di prodotti - Parte 6: Assorbimento acustico in ambienti chiusi
- UNI/TR 11175, Acustica in edilizia - Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici - Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale
- UNI 11296, Acustica - Linee guida per la progettazione, la selezione, l'installazione e il collaudo dei sistemi per la mitigazione ai ricettori del rumore originato da infrastrutture di trasporto
- UNI 11516, Indicazioni di posa in opera dei sistemi di pavimentazione galleggiante per l'isolamento acustico
- UNI 11143, Parti 1-6, Acustica - Metodo per la stima dell'impatto e del clima acustico per tipologia di sorgenti"
- UNI 9884, Acustica - Caratterizzazione acustica del territorio mediante la descrizione del rumore ambientale
- UNI 10855, Acustica - Misura e valutazione del contributo acustico di singole sorgenti

## **Norme per il collaudo**

- UNI EN ISO 16283-1, Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 1: Isolamento acustico per via aerea
- UNI EN ISO 16283-2, Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e di elementi di edificio - Parte 2: Isolamento dal rumore di calpestio
- UNI EN ISO 16283-3, Acustica - Misure in opera dell'isolamento acustico in edifici e

di elementi di edificio - Parte 3: Isolamento acustico di facciata

- UNI EN ISO 9921, Ergonomia - Valutazione della comunicazione verbale
- UNI 8199, Acustica in edilizia - Collaudo acustico di impianti a servizio di unità immobiliari - Linee guida contrattuali e modalità di misurazione all'interno degli ambienti serviti
- UNI EN ISO 3382-1, Acustica - Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 1: Sale da spettacolo
- UNI EN ISO 3382-2, Acustica - Acustica - Misurazione dei parametri acustici degli ambienti - Parte 2: Tempo di riverberazione negli ambienti ordinari
- CEI EN 60268-16, Apparecchiature per sistemi elettroacustici - Parte 16: Metodi di valutazione dell'intelligibilità del parlato per mezzo dell'indice di trasmissione del parlato

## Norme per i valori di riferimento

- UNI 11367, Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera
- UNI EN 14351-1, Finestre e porte - Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali - Parte 1: Finestre e porte esterne pedonali senza caratteristiche di resistenza al fuoco e/o di tenuta al fumo
- UNI EN 12207, Finestre e porte - Permeabilità all'aria - Classificazione
- UNI EN 12152, Facciate continue - Permeabilità all'aria - Requisiti prestazionali e classificazione
- UNI 11532, Acustica in edilizia - Caratteristiche acustiche interne di ambienti confinati
- DIN 18041, Hörsamkeit in Räumen - Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung (Acoustic quality in rooms - Specifications and instructions for the room acoustic design).